PHILIPS

CURSUS BEDRIJFSELEKTRONICA

Elektronische componenten

Leerlingboek BS 6

Philips Nederland B.V. - Afd. Onderwijsactiviteiten

Tweede, herziene druk 1976

Zevende druk 1981

161220•5

PHILIPS

CURSUS BEDRIJFSELEKTRONICA

Elektronische componenten

Leerlingboek BS 6

Philips Nederland B.V. - Afd. Onderwijsactiviteiten

Tweede, herziene druk 1976

Zevende druk 1981

161220.6

INHOUDSOPGAVE

B 221

DE VELDEFFECT-TRANSISTOR

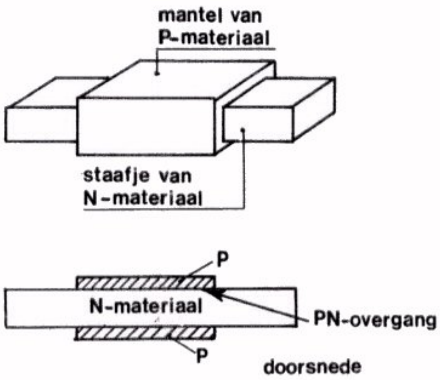
In het voorafgaande hebben we de lagentransistor behandeld.
In deze en de volgende lessen gaan we ons bezig houden met een geheel ander type transistor, namelijk de *veldeffect-transistor*. Deze noemt men vaak kortweg FET, afkorting van de engelse benaming "field effect transistor".

De lagentransistor en de FET worden voor dezelfde doeleinden gebruikt, maar hun werking berust op geheel andere principes.

De FET bezit enige voordelen ten opzichte van de lagentransistor. In een van de volgende lessen gaan we daar nog op in. In deze les zal reeds blijken dat de FET een zeer hoge ingangsweerstand heeft.

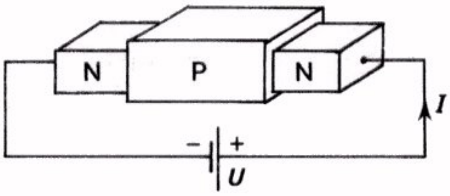
DE OPBOUW VAN EEN FET

Een veldeffect-transistor is een halfgeleider-component, bestaande uit silicium. In zijn eenvoudigste vorm is hij een staafje N-materiaal, waaromheen een mantel bestaande uit P-materiaal.
Het is ook mogelijk het staafje van P- en de mantel van N-materiaal te vervaardigen.



Tussen het staafje en de mantel bevindt zich een P-N overgang. Staafje en mantel vormen samen een diode.

Het staafje wordt ook wel "kanaal" genoemd.

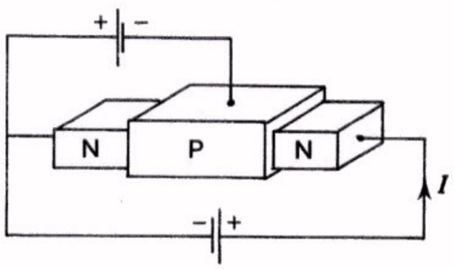


De uiteinden van het kanaal worden met een spanningsbron verbonden. Er vloeit dan een hoofdstroom

$$I = \frac{U}{R_k}$$

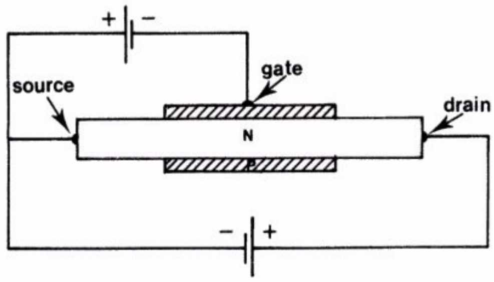
door dit kanaal.

Hierin is U de spanning van de spanningsbron en R_k de kanaalweerstand.



Die hoofdstroom I is te beïnvloeden door een spanning tussen het P- en het N-materiaal aan te sluiten. De polariteit van deze spanning moet zodanig zijn, dat de diode in sperrichting is aangesloten.
De stroom door de P-N overgang is een sperstroom en dus zeer klein.

BENAMING VAN DE AANSLUITINGEN.



De aansluitingen aan het kanaal noemt men:

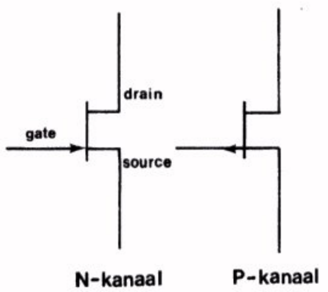
source, (spreek uit "sos', met langgerekte o).

en *drain* , (dreen).

De aansluiting aan de mantel heet: *gate*, ("geet").

Vergelijken we met een lagentransistor, dan komt de gate overeen met de basis, de source met de emitter en de drain met de collector. De woorden source, gate en drain kort men af met de beginletters: s, g en d.

SCHEMASYMBOOL



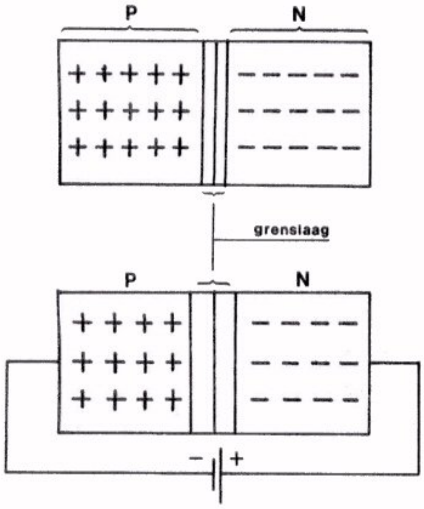
Hier ziet u de symbolen voor een FET zoals die in schema's worden gebruikt. Links staat een FET met N-kanaal, rechts een met P-kanaal.

Het pijltje bij de gate-aansluiting geeft de richting aan van de voorwaartsstroom in deze diode.
Hieraan is te zien of het kanaal van P of N materiaal gemaakt is.

Het pijltje wijst altijd, juist zoals bij dioden en de hiervoor behandelde transistors van het P- naar het N-materiaal; van + naar - dus.

DE GRENSLAAG VAN EEN P-N-OVERGANG

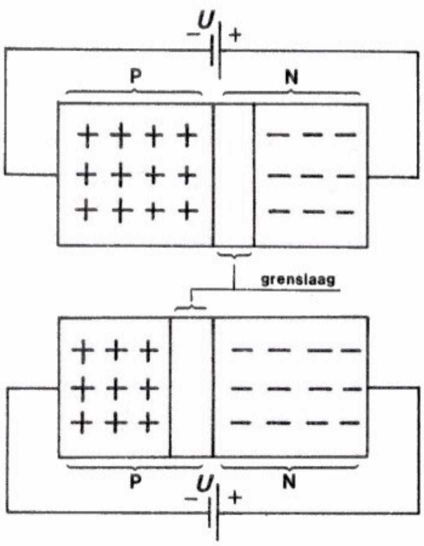
Bij de behandeling van de halfgeleiderdiode hebben we gezien dat deze bestaat uit een P- en een N-deel. Het P-deel geleidt de stroom vrij goed door de aanwezigheid van gaten en het N-deel ook dankzij de daarin aanwezige vrije elektronen.



Er blijkt zich bij de overgang van het P- naar het N-deel een gebiedje te bevinden waarin geen beweeglijke ladinkjes zitten. Deze zogenaamde *grenslaag* vormt een isolerend laagje tussen het geleidende P- en N-deel.

Voert men een sperspanning toe, dan wordt de grenslaag breder. Hoe groter de sperspanning, des te breder de grenslaag.

Men kan ervoor zorgen dat deze grenslaag zich voornamelijk in het P- of in het N-deel uitstrekt. Dit hangt af van de samenstelling van het P- en het N-materiaal. Bij FET's is ervoor gezorgd dat de grenslaag zich vrijwel geheel in het kanaal uitstrekt.



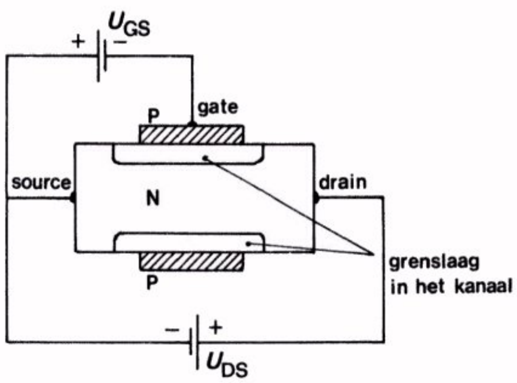
Hiernaast ziet u een v orbeeld van het geval dat de grenslaag zich in hoofdzaak in het N-deel van de diode uitstrekt.
Op deze wijze ontstaat in het N-deel een brede isolerende laag, waarvan de grootte afhangt van de spanning *U*.

Nu bevindt zich de grenslaag voornamelijk in het P-deel. Ook in dit geval is de breedte van de isolerende laag afhankelijk van de spanning *U*.

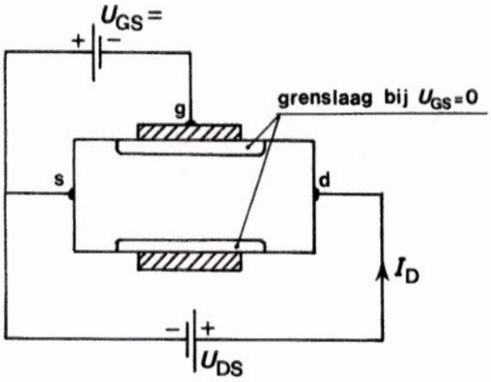
Van de eigenschap dat de grenslaag zich hoofdzakelijk in het P- of N-deel uitstrekt en de grootte van deze grenslaag afhankelijk is van de spanning tussen het P- en N-deel, maakt men gebruik bij de veldeffect-transistor.

DE WERKING VAN DE VELDEFFECT-TRANSISTOR.

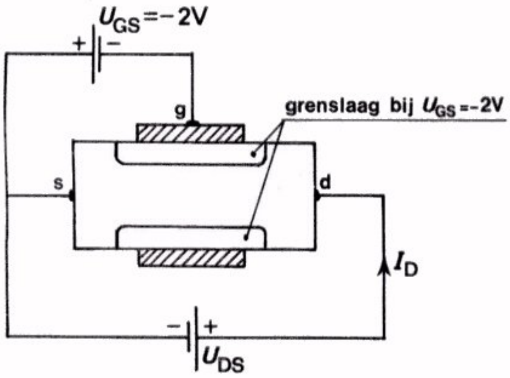
Hieronder is nogmaals een doorsnede van een FET getekend. Het kanaal bestaat uit N- en de gate uit P-materiaal. Kanaal en gate vormen samen een diode. Tussen gate en source is een kleine (negatieve) sperspanning U_{GS} aangesloten. Tussen drain en source is een grotere positieve spanning U_{DS} aangebracht.



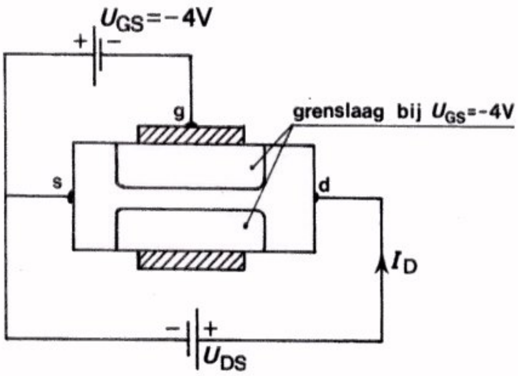
De samenstelling van het P- en het N-materiaal is zodanig, dat de grenslaag zich voornamelijk in het N-kanaal bevindt.
Gaan we de sperspanning U_{GS} nu opvoeren, dan gaat de isolerende sperlaag zich steeds verder in het N-kanaal uitstrekken. De weerstand van het kanaal neemt dan dus steeds toe en bij een vaste spanning U_{DS} neemt de stroom door het kanaal steeds af.
Op volgend blad is dit schematisch in beeld gebracht.



U_{GS} = 0 V. De grenslaag strekt zich slechts over een klein gebied uit. De drainstroom I_D vloeit ongehinderd door het kanaal.
De kanaalweerstand is minimaal en I_D is maximaal.



U_{GS} = -2 V. De grenslaag dringt het N-kanaal in. Omdat de grenslaag een isolerende laag is, is de doorgang voor stroom verminderd.
De kanaalweerstand is toegenomen en I_D is afgenomen.



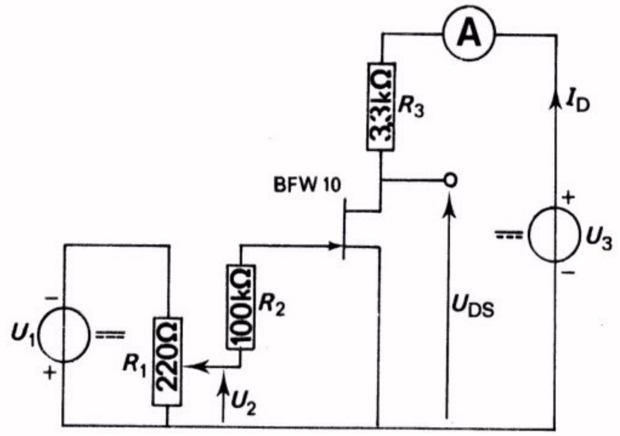
U_{GS} = -4 V. De grenslaag is verder toegenomen, waardoor er slechts een smalle geleidende doorgang overblijft. I_D is nog meer afgenomen.

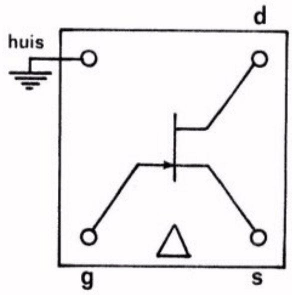
Bij een verdere verhoging van U_{GS} wordt het moment bereikt, dat de grenslaag zich uitstrekt over de volle breedte van het kanaal. Het kanaal is dan praktisch een volledige isolator geworden, zodat de stroom I_D vrijwel tot 0 is teruggebracht.

Met behulp van de spanning U_{GS} kan men dus de grootte van de stroom door de transistor sterk beïnvloeden. Het is alsof men een "kraan" bedient, die het kanaal meer of minder dichtdraait.

OPDRACHT: "DE GELIJKSTROOMINSTELLING VAN EEN FET".

In deze opdracht gaan we de verschillende gelijkstromen en spanningen meten aan een veldeffect-transistor.
Deze transistor is opgenomen in een veel voorkomende versterkerschakeling.





Bovenaanzicht vierpool met BFW 10.

- Bouw deze schakeling op het oefenpaneel. De weerstand R_2 is hier reeds opgenomen in verband met de volgende opdracht.

- Stel de voedingsspanningen in op volgende waarden:

  U_1 = -5 V, U_2 = -1,75 V en U_3 = 20 V.

- Meet I_D I_D = [mA]

  Meet U_{DS} U_{DS} = [V]

- U_{DS} is ook te berekenen, immers:

$$U_{DS} = U_3 - U_{R_3}$$

  Bereken U_{DS} en controleer de gemeten waarde.

- Varieer met behulp van R_1 de ingangsspanning en let op de variatie van I_D.

  U ziet: als U_{GS} toeneemt, dan wordt I_D kleiner.

  Dit is in overeenstemming met hetgeen reeds op Blad B221-6 is uiteengezet. Door toename van U_{GS} wordt de grenslaag groter, waardoor het kanaal smaller wordt en dus de kanaalweerstand groter. Hierdoor wordt de stroom door de transistor kleiner.

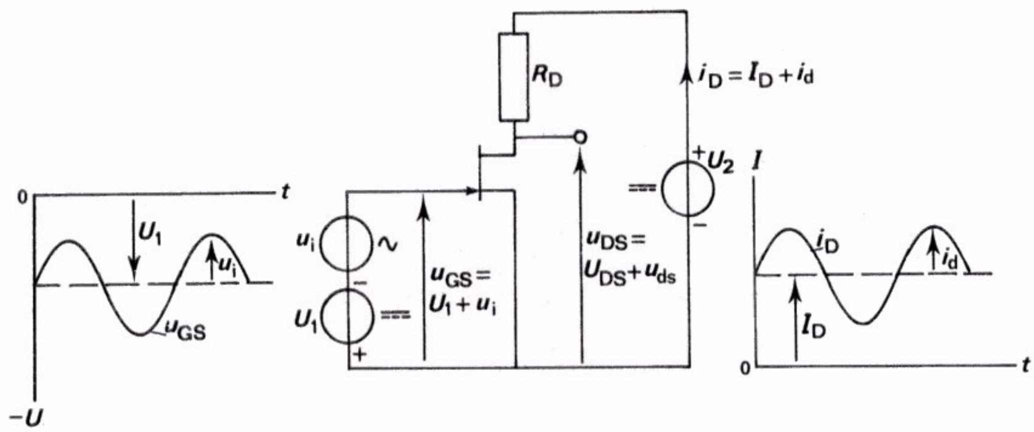
WISSELSPANNINGSVERSTERKING MET EEN FET.

In vorige opdracht zagen we dat we de gelijkstroom door een FET kunnen variëren. Van deze eigenschap maakt men gebruik om wisselspanningen te versterken.Brengt men in serie met de gelijkspanning U_1 nog een wisselspanningsbron aan met een spanning u_i, dan is de ingangsspanning van de FET gelijk aan:

$$u_{GS} = U_1 + u_i$$

Deze ingangsspanning veroorzaakt door de transistor een stroom:

$$i_D = I_D + i_d$$



Een belastingsweerstand R_D in serie met de transistor doet aan de uitgang de spanning $u_{DS} = U_{DS} + u_{ds}$ ontstaan. De grootte van de wisselspanning

$$u_d = R_D \cdot i_d.$$

Als de waarde van R_D groot genoeg is, kan de spanning u_d groter zijn dan u_i.

Er treedt dan wisselspanningsversterking op.

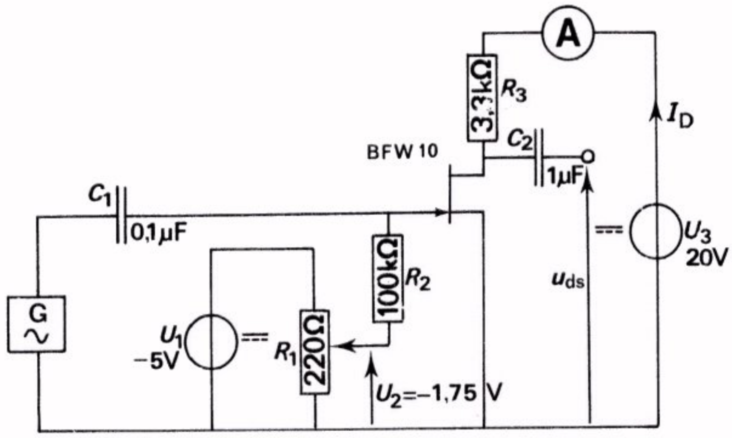
De grootte van deze versterking bedraagt:

$$A_u = \frac{u_d}{u_i}$$

In de volgende opdracht zullen we de wisselspanningsversterking meten van de schakeling, waarvan we in de vorige opdracht de gelijkstroominstelling hebben bepaald.

OPDRACHT: "HET METEN VAN DE WISSELSPANNINGSVERSTERKING".

In deze meetopdracht zullen we zien dat men met een FET, evenals met een lagentransistor, wisselspanningen kan versterken.



- Breid de schakeling op uw paneel uit tot bovenstaande.
  Maak U_1 U_2 en U_3 weer even groot als bij het begin van de vorige opdracht. De gelijkstroominstelling van de BFW10 blijft dan ongewijzigd.
- Stel de *LF*-generator in op U_{it} = 100 mV en 1 kHz.
- Meet de wisselspanningsversterking van de schakeling.

$$A_u = \frac{u_{ds}}{u_i} = \text{———} = \boxed{}$$

Opmerking omtrent R_2:

R_2 voorkomt dat de wisselspanningsbron vrijwel wordt kortgesloten via R_1.
In een van de volgende lessen komen we hierop nader terug.

DE INGANGSWEERSTAND VAN EEN FET

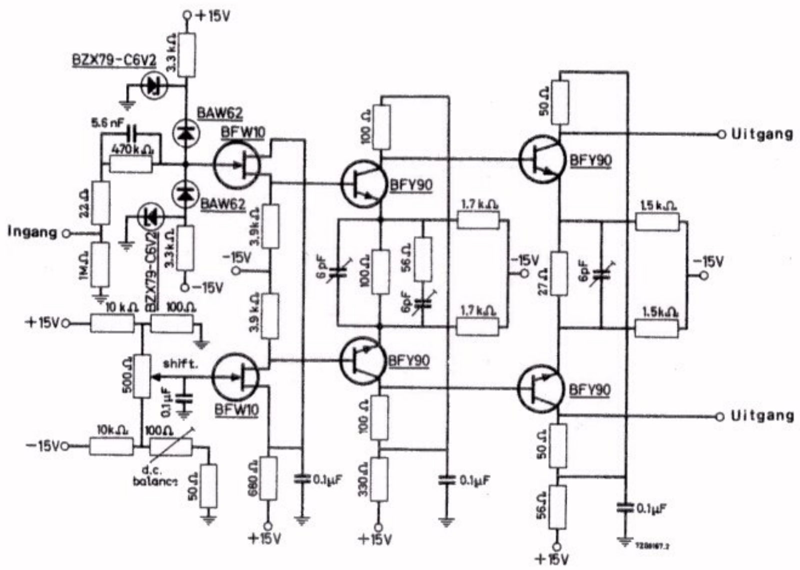
De ingang van een FET bestaat zoals we weten uit een diode die in *sperrichting* is aangesloten. De FET bezit hierdoor een hoge ingangsweerstand. Dit geldt zowel voor wissel- als voor gelijkstroom. Fabrikanten geven voor de ingangswisselstroomweerstand van FET's waarden op tot 1000 MΩ.

De ingang van een lagentransistor is eveneens een diode, maar die is in de *doorlaatrichting* aangesloten. Een lagentransistor heeft dan ook een aanzienlijk lagere ingangsweerstand dan de FET.

In de praktijk komen vele schakelingen voor waarbij een hoge ingangsweerstand van groot belang is. Denk b.v. aan de ingangsweerstand bij een oscilloscoop. Vooral aan de ingang van versterker worden FET's met voordeel toegepast.

ONTHOUD:

Een FET heeft in vergelijking met een lagentransistor een *veel hogere ingangsweerstand.*

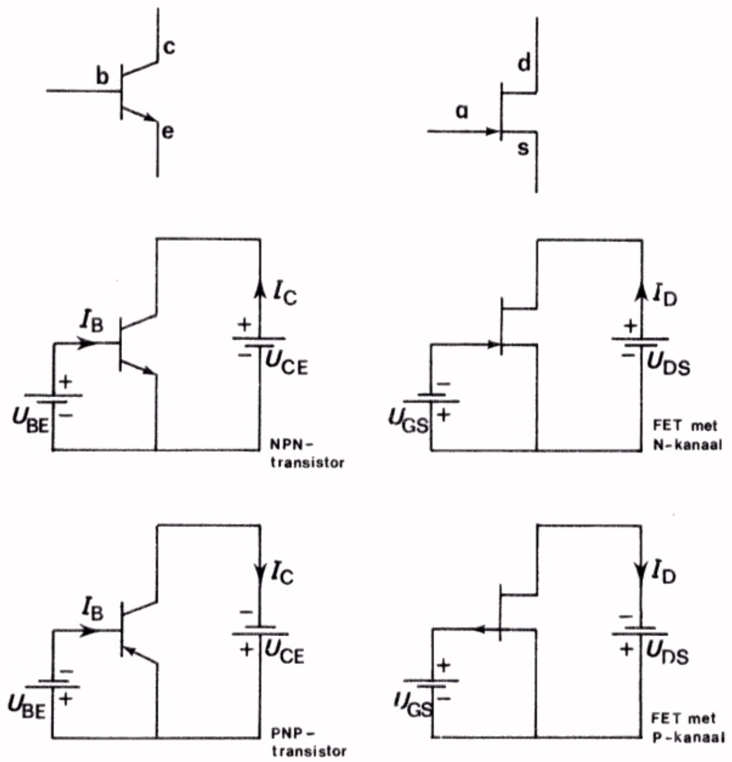


Hier ziet u een toepassingsvoorbeeld van de FET. Het is het ingangscircuit van een oscilloscoop; de beide BFW 10 FET's hebben een gemeenschappelijke drain weerstand.

VERGELIJKING AANSLUITSCHEMA'S VAN DE FET EN DE LAGENTRANSISTOR.

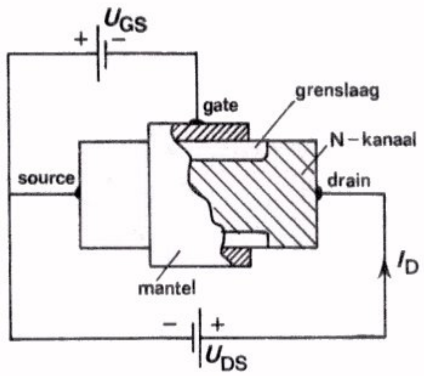
Bij de voorafgaande metingen is reeds duidelijk geworden dat het gedrag van een FET in een schakeling sterke overeenkomsten vertoont met dat van de lagentransistor.
We vergelijken hieronder de aansluitingen van FET en lagentransistor met elkaar.

LAGENTRANSISTOR FET



Voedingsspanningen:	basis en collector hebben dezelfde polariteit ten opzichte van emitter.	gate en drain hebben tegengestelde polariteit ten opzichte van source.
Ingangscircuit	diode in doorlaatrichting.	diode in sperrichting
	lage ingangsweerstand.	hoge ingangsweerstand

SAMENVATTING



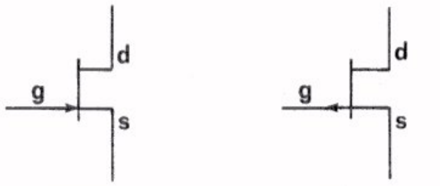
- Een veldeffect-transistor (FET) bestaat uit een staafje N-materiaal, waaromheen een mantel van P-materiaal is aangebracht.

  Het omgekeerde komt ook voor. Het staafje is dan van P- en de mantel van N-materiaal.

- Het staafje noemt men het *kanaal* en de mantel de *gate*. Kanaal en gate vormen samen een diode.

- De uiteinden van het kanaal noemt men *drain* en *source*.

  In schema's gebruikt men voor de veldeffect-transistor het volgende symbool:



N-kanaal FET P-kanaal FET

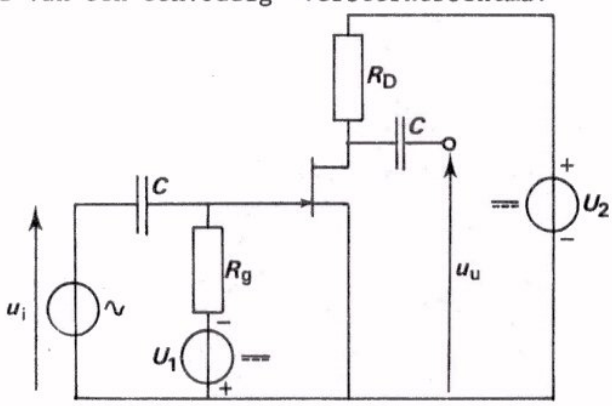
- Tussen gate en source wordt een sperspanning U_{GS} aangesloten. Tussen drain en source wordt een grotere tegengestelde spanning U_{DS} aangesloten.

- Door de stuurspanning U_{GS} te veranderen kan men de grootte van de transistorstroom I_D tussen drain en source laten toe- of afnemen.

- Als men tezamen met de gelijkspanning U_{GS} een wisselspanning u_{gs} toevoert, gaat er tezamen met de gelijkstroom I_D een wisselstroom i_d door de transistor lopen. Deze kan over een weerstand R_D in de drainleiding een versterkte wisselspanning $R_D \cdot i_d$ veroorzaken.

- Op de ingang van de veldeffect-transistor is een sperspanning aangesloten. Daardoor heeft de veldeffect-transistor een zeer *hoge ingangsweerstand*, (10^7 tot 10^9 Ω). Dit is een van de grote voordelen van een FET ten opzichte van een lagentransistor.

- Voorbeeld van een eenvoudig versterkerschema:

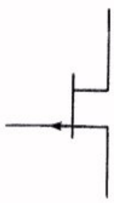


NAAM:

KLAS:

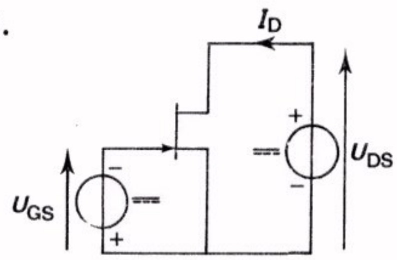
OEFENINGEN

1. Teken hieronder schematisch de opbouw van een P-kanaal FET. Geef in de tekening de namen van de delen en de aansluitingen aan.

2. 

Dit is het symbool van een FET met:

P-kanaal	o
N-kanaal	o

3. 

Als men de spanning U_{GS} vergroot, dan:

wordt I_D groter	o
wordt I_D kleiner	o
blijft I_D constant	o

B 222

DE KARAKTERISTIEKEN VAN DE FET

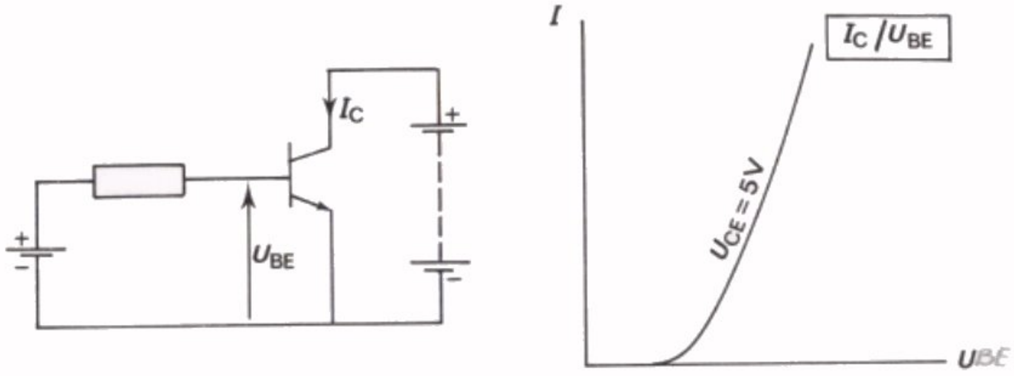
INLEIDING

In de vorige les maakten we voor het eerst kennis met de FET. We leerden iets over zijn opbouw en werking. In deze les komt het gedrag van de FET uitvoeriger ter sprake. Juist zoals bij de lagentransistor kunnen we dit gedrag het best inzien aan de hand van *karakteristieken*. Evenals bij de lagentransistor krijgen we te maken met:

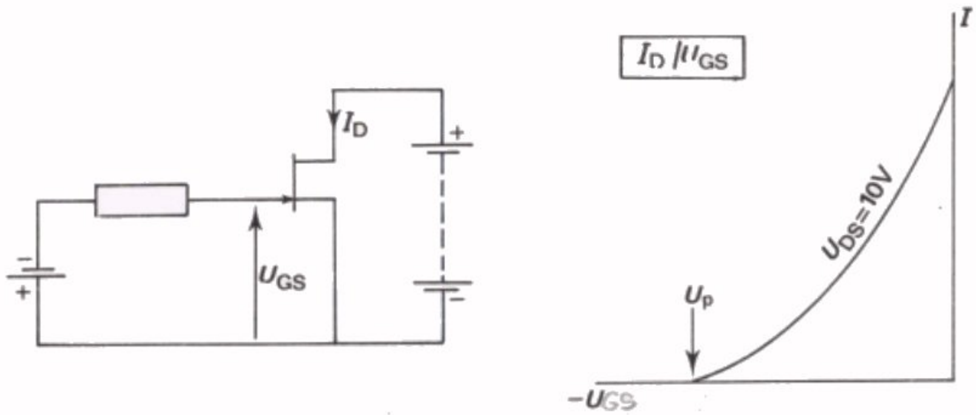
- een overdrachtskarakteristiek.
  Deze legt verband tussen de ingangsspanning en de uitgangsstroom bij de FET.
- de uitgangskarakteristiek.
  Deze legt verband tussen de uitgangsspanning en de uitgangsstroom.

DE OVERDRACHTKARAKTERISTIEK

We brengen in herinnering dat we bij de lagentransistor met een overdrachtskarakteristiek te maken hebben gehad. Deze karakteristiek legde een verband tussen de spanning U_{BE} aan de ingang en de stroom I_C aan de uitgang van de transistor.



Ook bij de FET wil men weten hoe groot de uitgangsstroom I_D is bij een zekere ingangsspanning $-U_{GS}$.



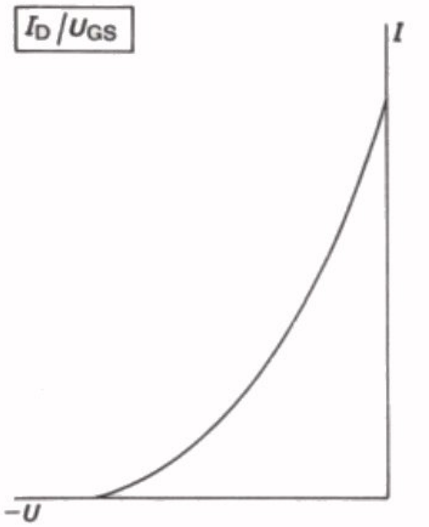
Hier is een overdrachtskarakteristiek van een FET getekend. Bij U_{GS} = 0 V trekt de FET stroom. Om de stroomsterkte te verminderen dient aan een FET een *negatieve* U_{GS} te worden toegevoerd. Vandaar dat de karakteristiek voor de kleinere I_D - waarden naar *links* wordt getekend. Bij de as staat $-U_{GS}$ om negatieve getallen te vermijden.

De getekende karakteristiek geldt bij U_{DS} = 10 V. Bij andere U_{DS}-waarden boven 3 V verloopt hij nagenoeg hetzelfde, daaronder duidelijk anders.

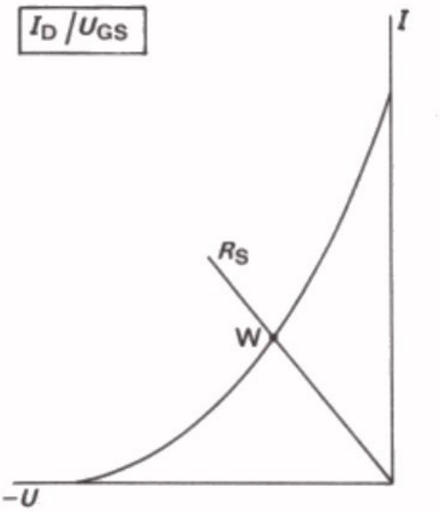
De ingangsspanning waarbij I_D = 0 noemt men de *afknijpspanning* U_P (P van het engels: "pinch off" = afknijpen).

BEPALING VAN DE AUTOMATISCH VERKREGEN NEGATIEVE GATE SPANNING

De instelling van de FET met behulp van een weerstand in de source-leiding kan grafisch bepaald worden.

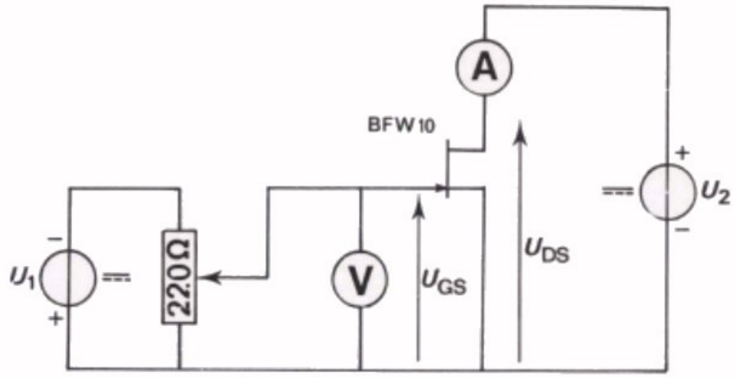


Dit is de overdrachtskarakteristiek van een FET. hierin is het verloop van de drainstroom gegeven als gevolg van een spanning tussen gate en source.
U ziet dat als U_{GS} = 0 V er een flinke stroom door de FET loopt. (hierbij is stilzwijgend aangenomen dat een gelijkspanning tussen drain en source is aangesloten).



In dezelfde grafiek tekenen we het verloop van de spanning over een weerstand R_s als gevolg van een stroom door deze weerstand. Voor het punt *W* geldt dat de stroom door de weerstand en de stroom door de FET aan elkaar gelijk zijn. De spanning over R_s is precies gelijk aan de benodigde voorspanning om de FET bij punt *W* in te stellen.

OPDRACHT: HET METEN VAN DE OVERDRACHTSKARAKTERISTIEK

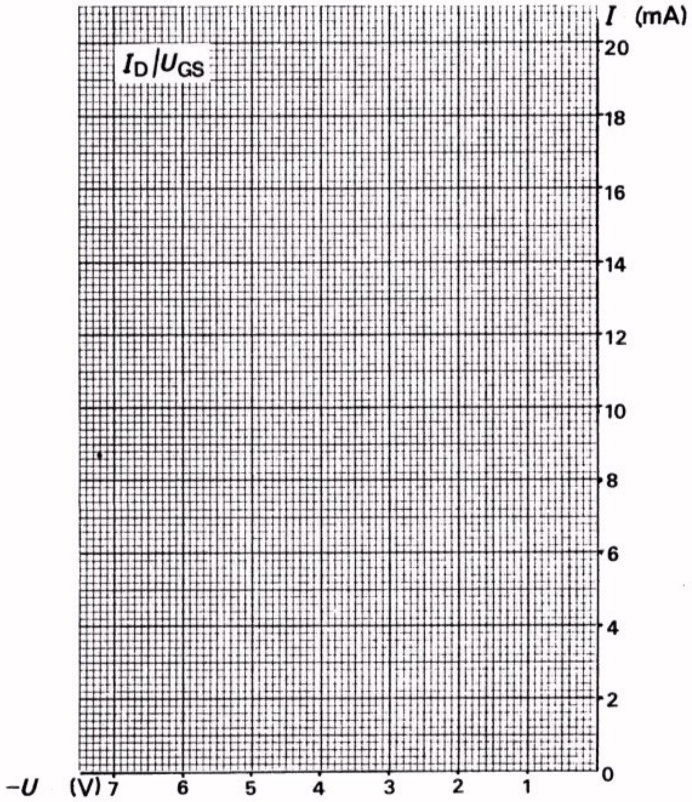


- Bouw deze schakeling.
- Maak de voedingsspanning U_2 gelijk aan 10 V.
- Meet I_D bij volgende waarden van U_{GS} en noteer de uitkomsten in de tabel.
- Meet ook de afknijpspanning U_P =
- Herhaal de metingen bij drainspanningen van 6 V en 2 V.

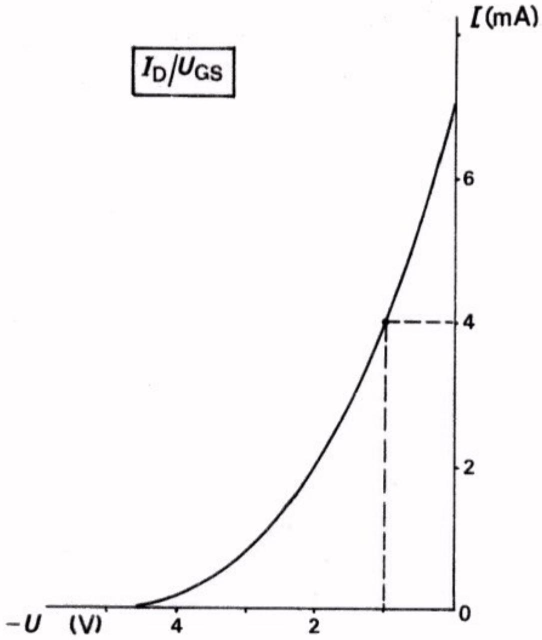
	U_{DS} = 10 V	U_{DS} = 6 V	U_{DS} = 2 V
$-U_{GS}$ (V)	I_D (mA)	I_D (mA)	I_D (mA)
0			
1			
2			
3			
4			
5			

- Schakel de spanningen uit.

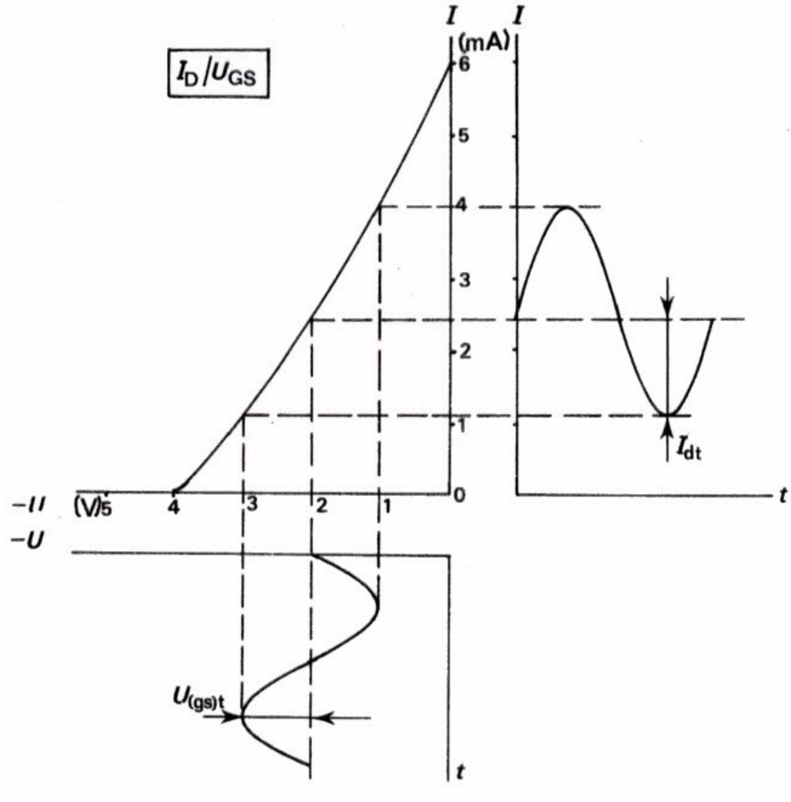
- Teken in volgende grafiek aan de hand van de waarden uit de tabel de I_D - U_{GS} - karakteristieken. Zet bij elke karakteristiek de waarden van U_{DS} waarbij hij gemeten is.



U ziet dat de karakteristiek voor U_{DS} = 10 V en die voor U_{DS} = 6 V nagenoeg samenvallen. Die voor U_{DS} = 2 V blijkt duidelijk lager te liggen. In de praktijk kiest men U_{DS} nooit lager dan ongeveer 5 V.

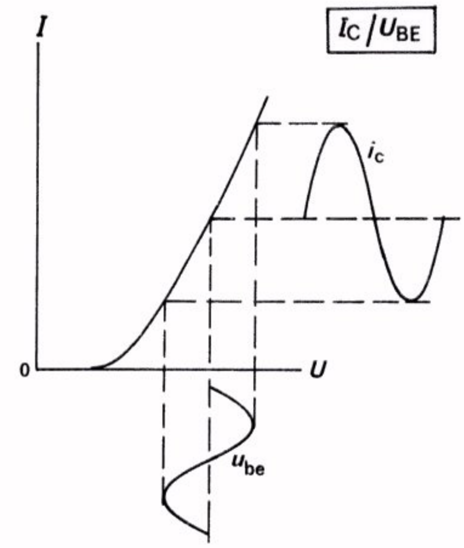


Hier ziet u nogmaals een overdrachtskarakteristiek van een FET. Met behulp van deze karakteristiek kan men de instelling van de FET bepalen. Moet de instelstroom van deze FET bijvoorbeeld 4 mA bedragen, dan moet de instelspanning $-U_{GS}$ gelijk zijn aan 1 V.



Met behulp van de overdrachtskarakteristiek kan men verder zien hoe een wisselspanning u_{gs} wordt verwerkt. In dit voorbeeld is de instelling: $-U_{GS}$ = 2 V en I_D = 2,5 mA. Voeren we aan de gate een wisselspanning $U_{(gs)t}$ = 1 V toe, dan lezen we af: I_{dt} = 1,5 mA.

DE STEILHEID EN DE WISSELSPANNINGSVERSTERKING



Bij de lagentransistor hebben we gesproken over de steilheid S. Deze bepaalden we aan de hand van de overdrachtskarakteristiek.

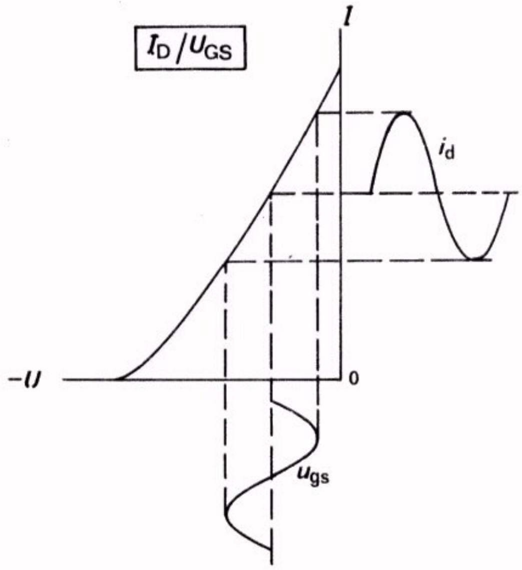
$$S = \frac{i_c}{u_{be}} = \frac{I_{ctt}}{U_{bett}}$$

Dit was een belangrijke grootheid met behulp waarvan we de wisselspanningsversterking konden bepalen:

$$A_u = S \cdot R_c.$$

Bij de FET spreken we eveneens van de steilheid S. Ook hier wordt deze bepaald aan de hand van de overdrachtskarakteristiek.

$$\boxed{S = \frac{i_d}{u_{gs}} = \frac{I_{d(tt)}}{U_{gs(tt)}}}$$



In "handbooks" wordt de steilheid van de FET veelal aangeduid met het symbool: y_{fs}.

Nu volgt dus: $i_d = S\, u_{gs}$.

Verder: $u_{ds} = i_d \cdot R_D = S\, u_{gs} \cdot R_D$.

Voor de wisselspanningsversterking:

$$A_u = \frac{u_{ds}}{u_{gs}} = \frac{S \cdot u_{gs} \cdot R_D}{u_{gs}}$$

volgt dan:

$$\boxed{A_u = S \cdot R_D}$$

Deze formule is van hetzelfde type als die bij de transistor.

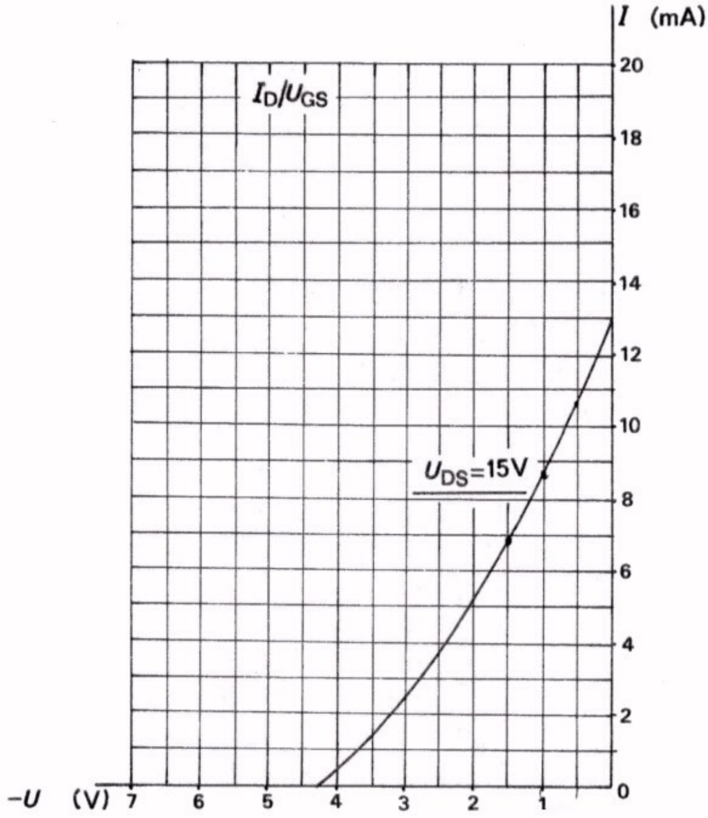
S = steilheid (A/V)

R_D = drainweerstand (Ω).

OPMERKING: De hier gegeven steilheid S wordt in de handboeken wel Y_{fs} genoemd. Hierin staat Y voor een verhouding $\frac{I}{U}$; f voor de voorwaartse (forward) overdracht en S voor de gemeenschappelijke source schakeling.

OEFENINGEN

1.



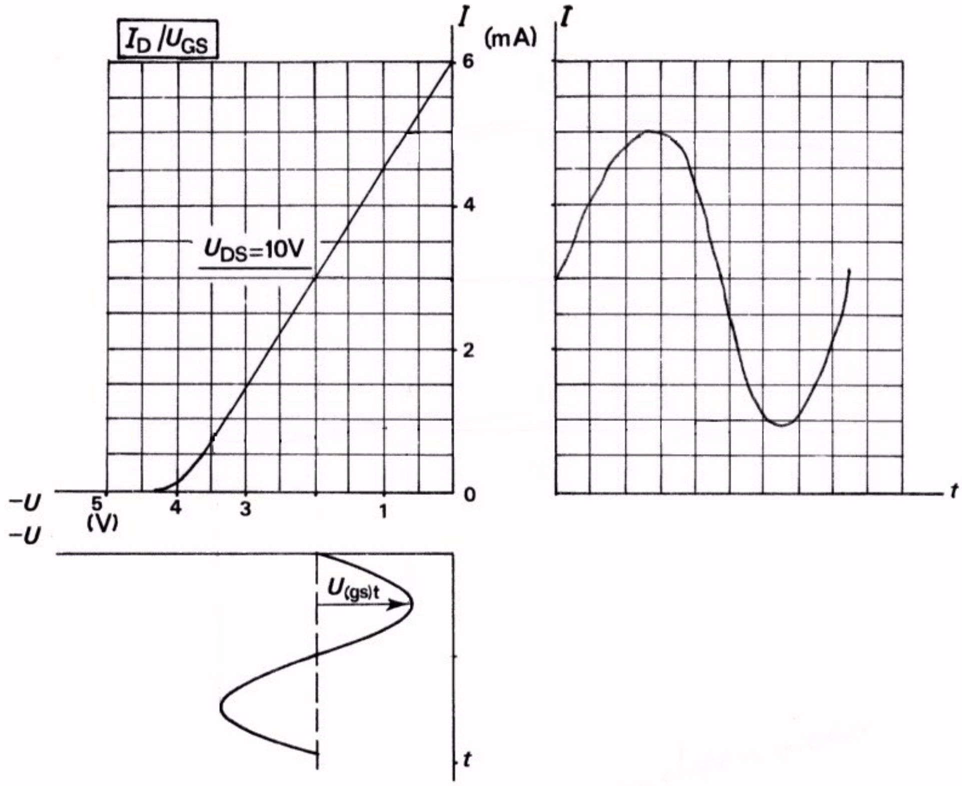
- Bepaal in deze grafiek de steilheid S voor: $U_{GS} = -1$ V en $U_{(gs)t} = 0{,}5$ V.

S =

- Bepaal ook de instelstroom die dan optreedt:

I_D =

2.



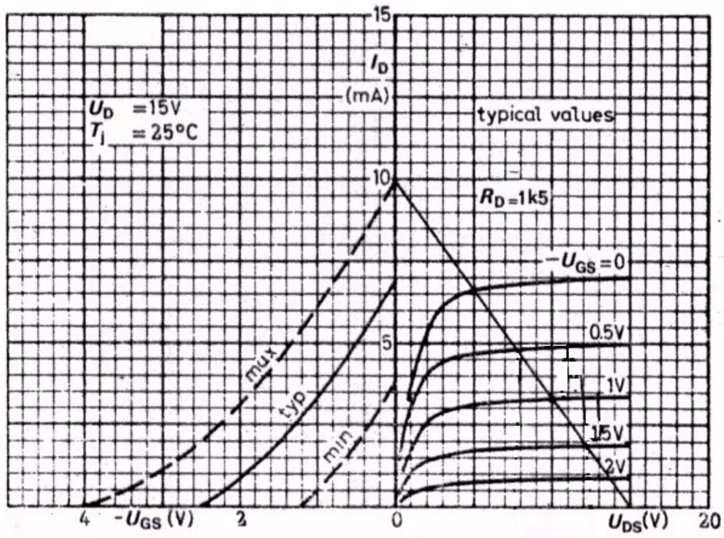
Hier is de overdrachtskarakteristiek van een FET gegeven.

- Hoe groot is de afknijpspanning? U_P =
- Bepaal de instelstroom I_D als U_{GS} = −2 V.

  I_D =
- Teken in bovenstaande figuur het verloopt van de uitgangswisselstroom bij de gegeven ingangswisselspanning.
- Hoe groot is de steilheid? S =

DE UITGANGSKARAKTERISTIEKEN

Een uitgangskarakteristiek legt het verband tussen de grootheden aan de uitgang van de FET, namelijk I_D en U_{DS}. Voor iedere ingangsspanning U_{GS} geldt een andere uitgangskarakteristiek. Hier ziet u een bundel uitgangskarakteristieken zoals de fabrikant die geeft. Daarnaast is tevens de reeds besproken overdrachtskarakteristiek gegeven.



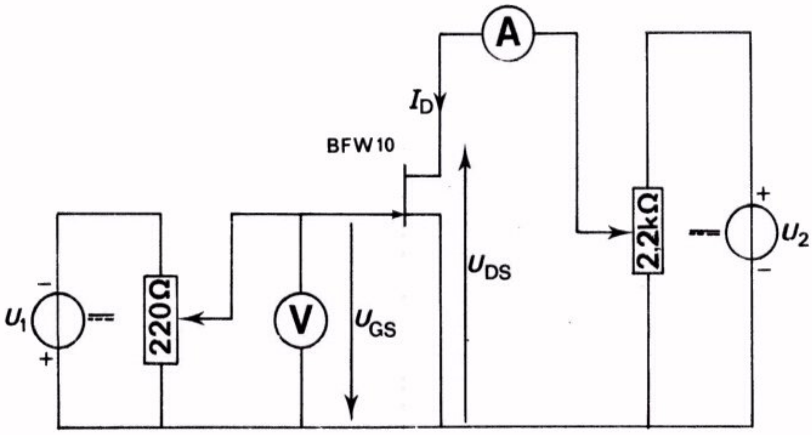
U ziet dat deze grafiek sterke overeenkomst vertoont met de door ons behandelde uitgangskarakteristieken van de lagentransistor. Er is één duidelijk verschil.
Bij de lagentransistor gold elke karakteristiek voor een bepaalde ingangs*stroom* I_B, terwijl bij de FET telkens een ingangs*spanning* U_{GS} is aangegeven.

Bij de lagentransistor is het nut van een uitgangskarakteristiekenbundel reeds duidelijk gebleken:

- Met behulp van een belastinglijn kan men op eenvoudige wijze het instelpunt bepalen.
- Aan de hand van die bundel kan men nagaan hoe wisselspanning wordt verwerkt.

Dit nut geldt ook voor de FET.

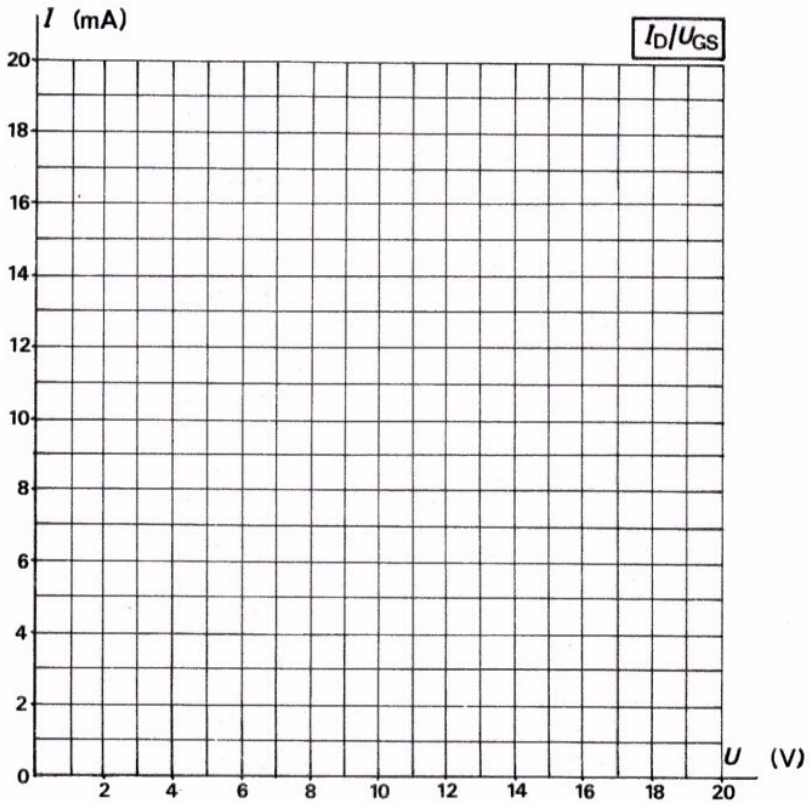
OPDRACHT: HET METEN VAN DE I_D - U_{DS} - KARAKTERISTIEK



- Verander de schakeling op uw paneel in die volgens dit schema. Stel U_1 op ongeveer 5 V en U_2 op 30 V.
- Maak de ingangsspanning U_{GS} = 0 V.
- Meet I_D bij de waarden van U_{DS} uit volgende tabel en noteer de meetresultaten in die tabel.
- Herhaal dezelfde metingen bij waarden van $-U_{GS}$ van: 0,5 V, 1 V, 2 V en 3 V. Noteer de resultaten.

$-U_{GS}$	U_{DS} =	0,5 V	1 V	2 V	5 V	10 V	20 V
0 V	I_D (mA) =						
0,5 V	I_D (mA) =						
1 V	I_D (mA) =						
2 V	I_D (mA) =						
3 V	I_D (mA) =						

- Zet de gevonden meetpunten uit in onderstaande grafiek en teken de karakteristieken. Zet bij elke karakteristiek de waarde van U_{GS} waarvoor hij geldt.



OEFENING

- Teken in bovenstaande grafiek de belastinglijn voor een voedingsspanning van 20 V en een drainweerstand van 1000 Ω.

- Bepaal vervolgens het werkpunt voor $-U_{GS}$ = 1 V.

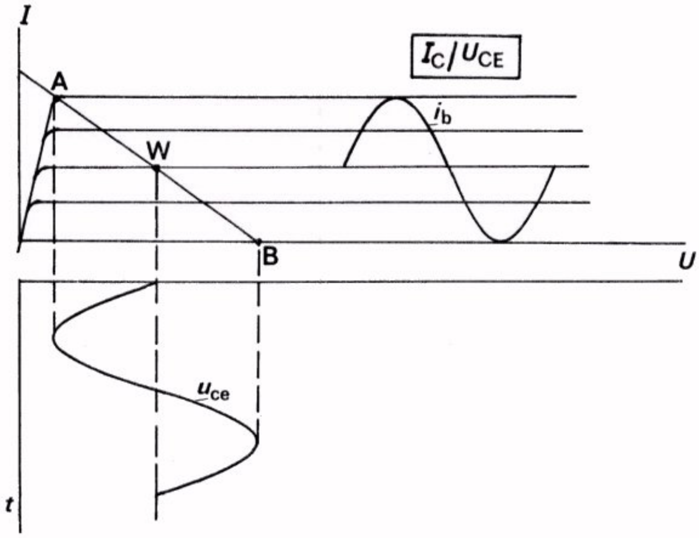
- Bepaal de gelijkstroominstelling:

I_D = [ ]

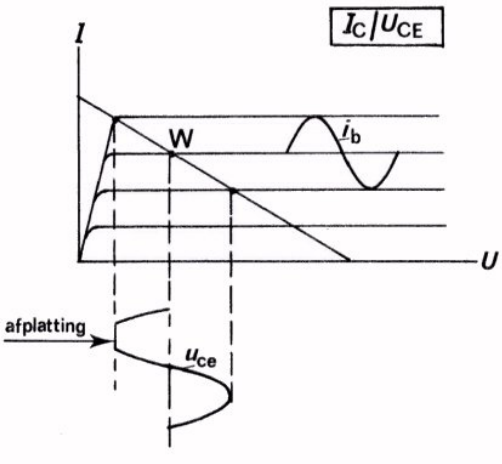
U_{DS} = [ ]

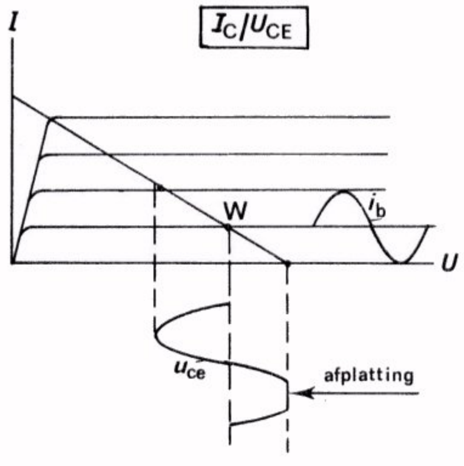
HET VERWERKEN VAN UITGANGSSIGNALEN

Bij de lagentransistor hebben we gezien hoe een uitgangssignaal werd verwerkt. We zagen dit aan de hand van de bundel uitgangskarakteristieken en de belastinglijn. Hier is dit nogmaals in beeld gebracht.



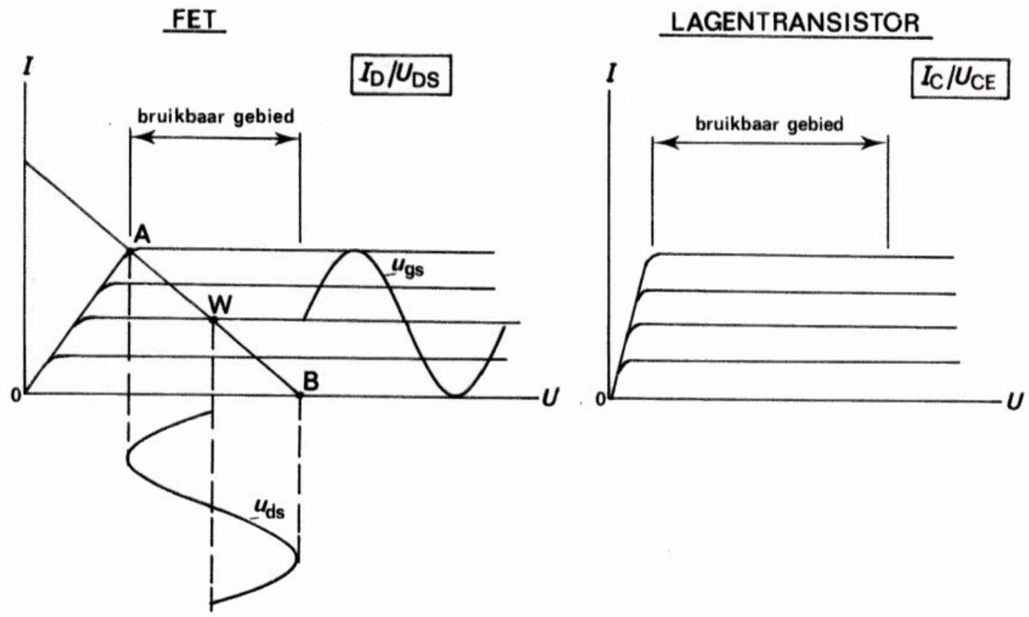
De transistor is ingesteld in het werkpunt W, ongeveer in het midden van de belastinglijn. In de figuur is aangegeven hoe de wisselstroom i_b verwerkt wordt tot de wisselspanning u_{ce}. We hebben ook gezien wat er gebeurt als W niet in het midden van de belastinglijn ligt.
In volgende figuren ziet u dit nog eens.





Het zal duidelijk zijn dat bij toenemende i_b, als W in het midden van de belastinglijn ligt, aan twee zijden van het uitgangssignaal tegelijkertijd afplatting op gaat treden. Ligt W niet in het midden, dan begint bij toenemen van i_b de afplatting aan één kant.

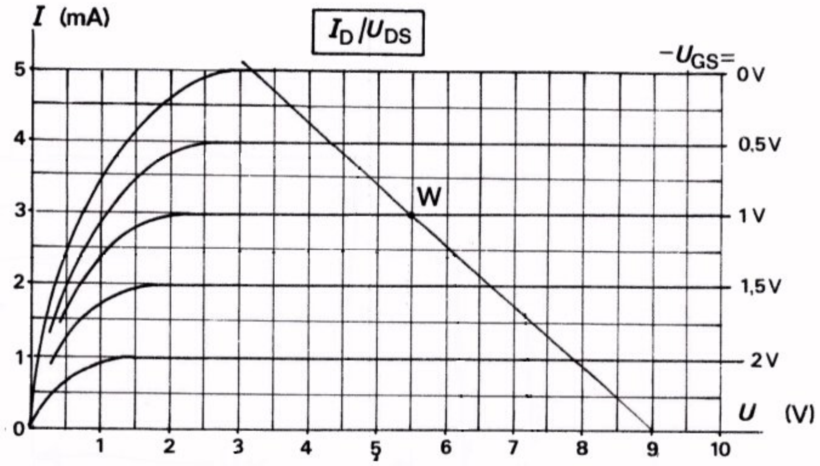
Bij de FET geldt hetzelfde. Hier ziet u hoe de ingangswisselspanning u_{gs} via de belastinglijn en de uitgangskarakteristieken verwerkt wordt tot de uitgangswisselspanning u_{ds}.



Toch is er enig verschil. Het horizontale deel van de karakteristieken loopt bij de FET veel minder ver naar links door. Vergelijk de bundels van FET en lagentransistor hierboven.

Bij de FET kan men dus een kleiner deel van de uitgangskarakteristiekenbundel benutten dan bij de lagentransistor. Men kan een FET minder ver uitsturen.

OEFENING



Hier is de bundel uitgangskarakteristieken van een FET gegeven. Het instelpunt moet in W liggen. De drainvoedingsspanning is 9 V.

- Teken de belastinglijn en bepaal vervolgens:

R_D =

I_D =

U_{DS} =

$-U_{GS}$ =

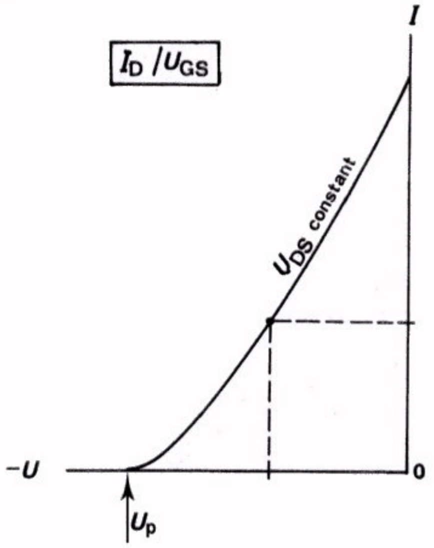
- Er wordt een uitgangswisselspanning verlangd met een effectieve waarde van 1,7 V. Bepaal:

$U_{(gs)t}$ =

I_{dt} =

- Bereken de wisselspanningsversterking.

A_u =

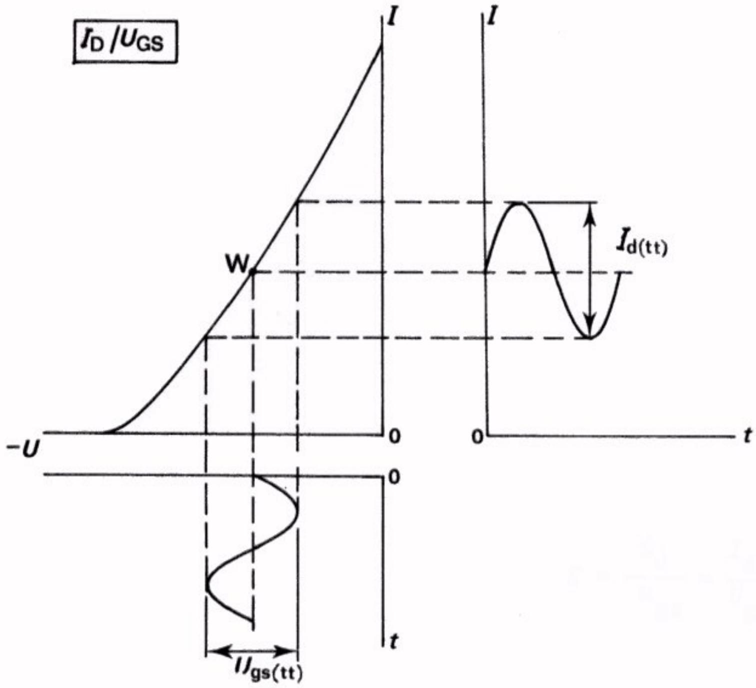


- De *overdrachts-* of I_D-U_{GS}-*karakteristiek* geeft het verband tussen de uitgangsstroom I_D en de ingangsspanning U_{GS}. Dit verband wordt gegeven voor een bepaalde uitgangsspanning U_{DS}.

  U_P is de *afknijpspanning.*

  Met behulp van deze karakteristiek kan de instelstroom bepaald worden.

- Is de ingangswisselspanning u_{gs} bekend, dan kan ook de uitgangswisselstroom i_d bepaald worden.

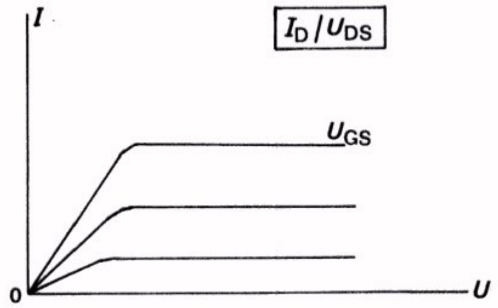


● De steilheid: $S = \frac{i_d}{u_{gs}}$

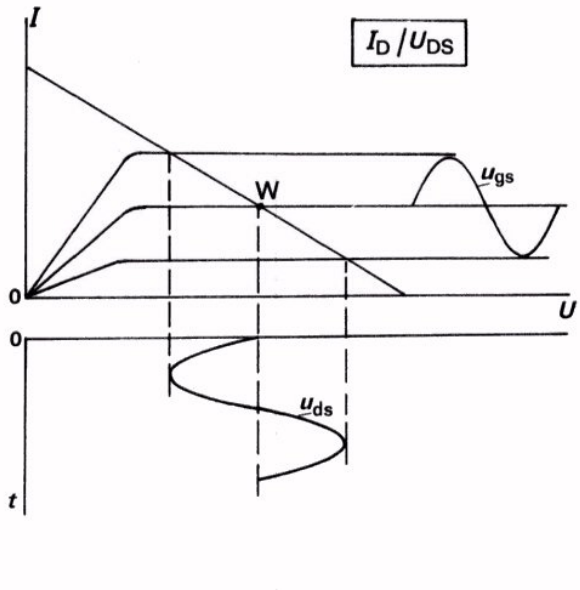
Is de steilheid bekend, dan kan de wisselspanningsversterking berekend worden:

$$A_u = S \cdot R_D$$

● De *uitgangskarakteristieken* geven het verband tussen de uitgangsstroom I_D en de uitgangsspanning U_{DS}. Dit verband wordt gegeven bij een bepaalde ingangsspanning U_{GS}.



Door middel van een belastinglijn in de bundel uitgangskarakteristieken kan men het instelpunt W bepalen. Tevens kan men nagaan hoe een wisselspanning u_{gs} wordt verwerkt tot een uitgangsspanning u_{ds}.

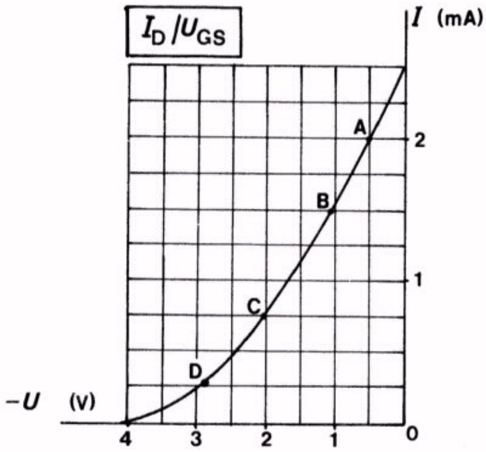


NAAM:

KLAS:

OEFENINGEN

1\.



Dit is de overdrachtskarakteristiek van een FET.

Hoe groot is de afknijpspanning?

U_P =

I_D moet ingesteld worden op 1 mA.
Geef in de grafiek het werkpunt aan en bepaal U_{GS}.

U_{GS} =

Bepaal de steilheid tussen de punten A en B.

$\frac{\Delta I_d}{\Delta U_{gs}}$ S =

Bepaal de stelheid tussen de punten C en D.

S =

2\. Van een FET is de steilheid S = 4 mA/V.
De drainweerstand R_D = 2,5 kΩ.
De ingangswisselspanning $U_{(gs)t}$ = 1,5 V.

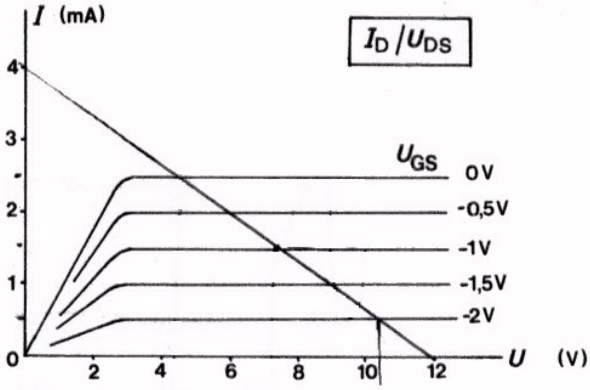
Bepaal: de amplitude van de uitgangswisselstroom: I_{dt} =

de amplitude van de uitgangswisselspanning: U_{dt} =

de wisselspanningversterking: A_u =

Controleer de laatste uitkomst met de formule: $A_u = S \cdot R_D$.

3.



Dit zijn de uitgangskarakteristieken van een FET.

De drainvoedingsspanning bedraagt: U_B = 12 V.

De drainweerstand is: R_D = 3 kΩ.

De spanning $U_{(gs)t}$ = 1 V; $-U_{GS}$ = 1 V.

Bepaal met behulp van de uitgangskarakteristiek achtereenvolgens:

U_D =	
I_D =	
I_{dt} =	
U_{dt} =	
A_u =	

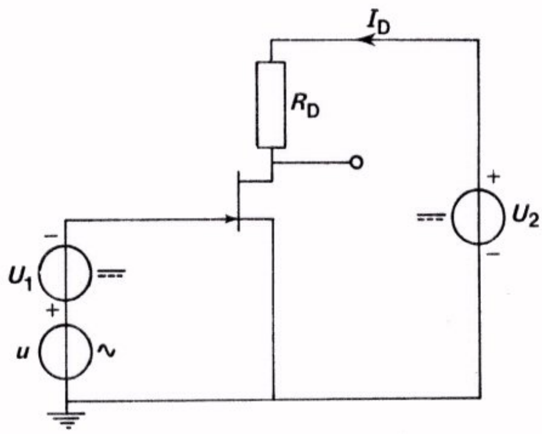
B 223

DE FET IN GEAARDE SOURCE-SCHAKELING

INLEIDING

We hebben het gedrag van een FET leren kennen en nader bekeken aan de hand van grafieken. In de vorige les hebben we al gezien dat het mogelijk is door middel van een FET wisselspanning te versterken. In deze les gaan we een complete versterker-schakeling met een FET behandelen. Juist zoals bij de lagentransistor zijn hier drie grondschakelingen mogelijk. De schakeling van deze les is de zogenaamde *geaarde* of *gemeenschappelijke source-schakeling*.

DE GEAARDE SOURCE-SCHAKELING



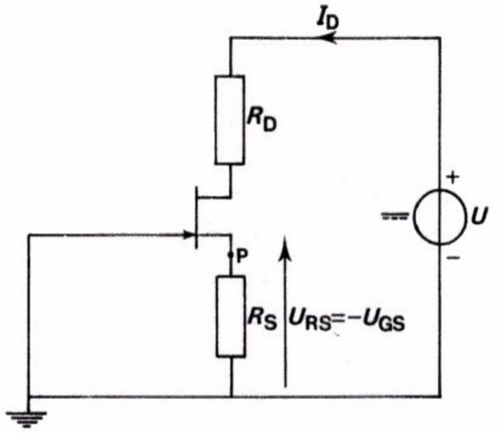
Dit is het principe-schema van een versterkertrap in GSS (geaarde source schakeling), zoals we dit al eerder gebruikten. Voor de gelijkstroominstelling zijn twee spanningsbronnen opgenomen:

U_1 voor de instelspanning $-U_{GS}$
en U_2 voor de hoofdstroom I_D.

Het werken met twee spanningsbronnen is in de praktijk nogal lastig. Men heeft er daarom iets op gevonden. Het blijkt mogelijk met behulp van dezelfde spanningsbron die voor I_D zorgt automatisch ook een negatieve gate-spanning te verkrijgen.

DE AUTOMATISCHE NEGATIEVE GATESPANNING

De vraag is hoe we met slechts één gelijkspanningsbron kunnen bereiken dat de gate een negatieve spanning krijgt ten opzichte van de source. Daartoe passen we volgende "truc" toe.



U ziet dat in de source-leiding een weerstand R_S is opgenomen. De stroom I_D door de FET gaat ook door deze weerstand en doet daarover een spanning ontstaan:

$$U_{RS} = R_S \cdot I_D.$$

Hierbij wordt punt P positief ten opzichte van aarde. De gate ligt direkt aan aarde, zodat we ook kunnen zeggen dat punt P (de source dus) positief is ten opzichte van de gate. Of andersom, de gate wordt zodoende negatief ten opzichte van de source. De grootte van de gelijkspanning:

$$-U_{GS} = -U_{RS} = -R_S \cdot I_D.$$

Rekenvoorbeeld.

Stel I_D = 3 mA en R_s = 700 Ω.
De negatieve gate-spanning:

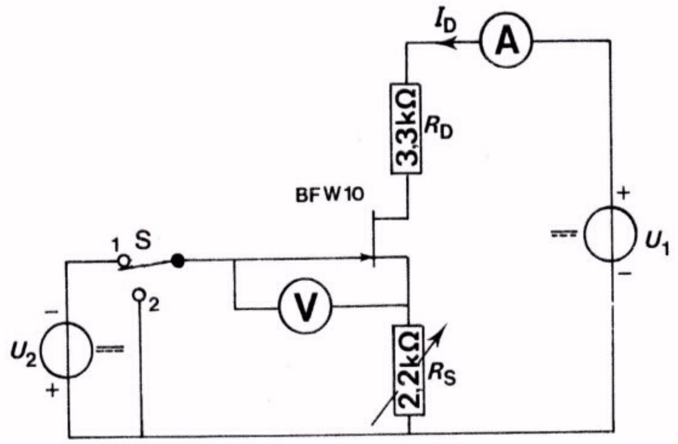
$$-U_{GS} = -R_S \cdot I_D = -3.10^{-3} \cdot 700 = -2{,}1 \text{ V}.$$

We hebben op deze wijze met één voedingsbron automatisch een negatieve gate-spanning verkregen.

OPDRACHT: METING AAN AUTOMATISCHE NEGATIEVE GATE-SPANNING

In deze opdracht gaan we de negatieve instelspanning voor de gate U_{GS} op twee manieren toevoeren. We zullen zien dat de hoofdstroom I_D door de FET in beide gevallen dezelfde blijft.

- Bouw volgende schakeling op uw paneel.



- Stel U_1 in op 25 V.
- Sluit R_S kort en zet S in stand 1.
- Stel U_2 zó in, dat I_D = 3 mA.
- Meet de instelspanning $-U_{GS}$. $-U_{GS}$ = ______

We hebben een negatieve gate - gelijkspanning verkregen met een aparte spanningsbron. In het volgende gaan we dezelfde gate-instelling automatisch verwezenlijken.

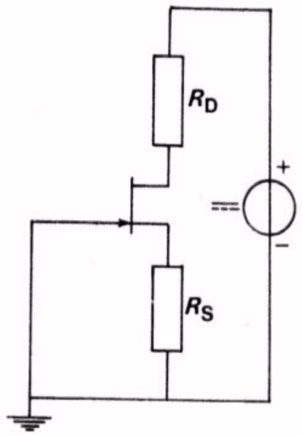
- Zet S in stand 2 en verwijder de kortsluiting over R_S.
- Houd U_1 op 25 V.
- Regel R_S zó, dat I_D weer gelijk wordt aan 3 mA.
- Meet $-U_{GS}$ weer. $-U_{GS}$ = ______

CONCLUSIE

Het blijkt mogelijk de negatieve gate-spanning automatisch te verkrijgen door middel van een source-weerstand.

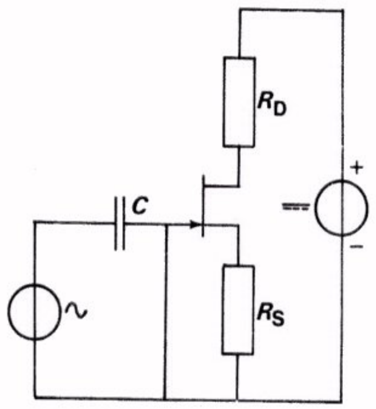
DE GATE-WEERSTAND

In het voorafgaande zagen we hoe we automatisch een negatieve gatespanning konden verkrijgen. We namen daartoe een sourceweerstand op en legden de gate aan aarde.

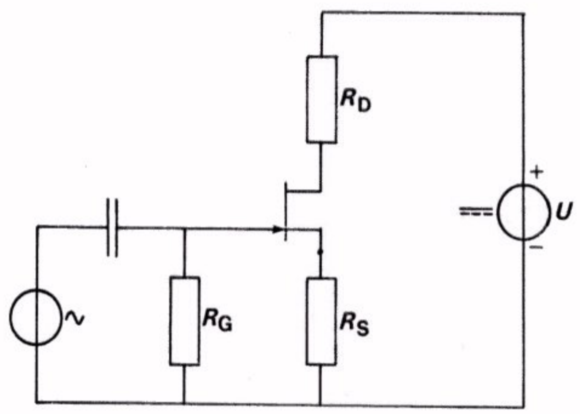


Nu is het de bedoeling om door middel van de FET wisselspanning te versterken.
De te versterken wisselspanning moet worden aangesloten tussen gate en aarde. Om eventueel aanwezige gelijkspanning te blokkeren doen we dit na een koppelcondensator C.

Tot onze schrik bemerken we nu dat de wisselspanningsbron kortgesloten is.

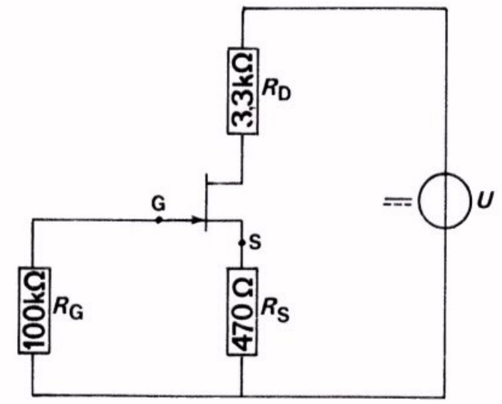


Om deze kortsluiting te voorkomen brengt men een grote, zogenaamde *gate-weerstand* R_G aan.
Omdat er door deze weerstand nagenoeg geen stroom loopt, verandert de negatieve gate-spanning daardoor vrijwel niet.
Het schema gaat er dan als volgt uitzien:



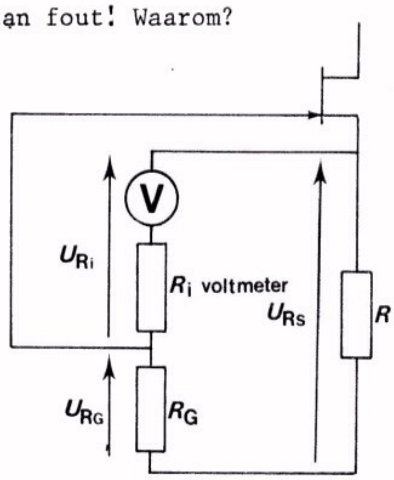
R_G is in de praktijk meestal veel groter dan de 100 kΩ die wij in onze meetopstellingen gebruiken.

HET METEN VAN DE INSTELSPANNING $-U_{GS}$



Hier ziet u het schema van de schakeling die we in het voorafgaande hebben behandeld. Stel dat u in deze schakeling de negatieve gate-spanning U_{GS} wilt meten. De mogelijkheid bestaat dat u daarvoor een voltmeter aansluit tussen de punten G en S. U doet het dan fout! Waarom?

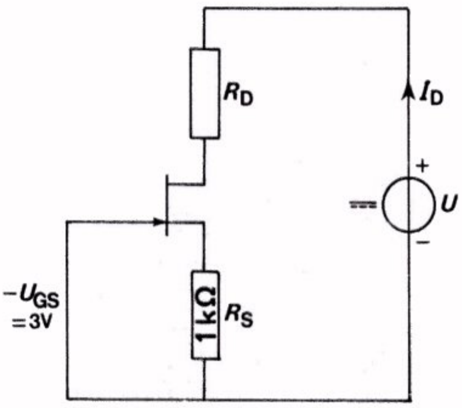
Door de schakeling met de voltmeter iets anders te tekenen wordt dit duidelijk. De spanning U_{RS} verdeelt zich namelijk over de R_i van de voltmeter en R_G. Als R_i ook gelijk is aan 100 kΩ, dan staat er tussen G en S niet meer de totale U_{RS}, zoals voor de aansluiting van de voltmeter het geval was, maar slechts de helft van U_{RS}. De FET is dan dus geheel anders ingesteld!



Vraag: Hoe zou u de negatieve gate-spanning bepalen?

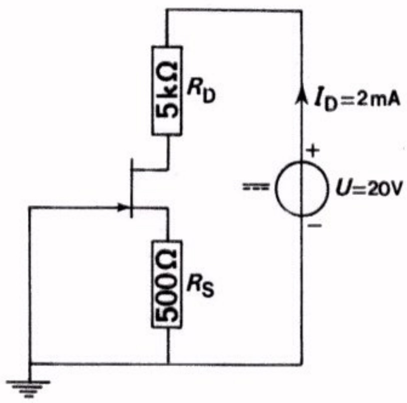
OEFENINGEN

1.



Bereken hier de drainstroom. I_D =

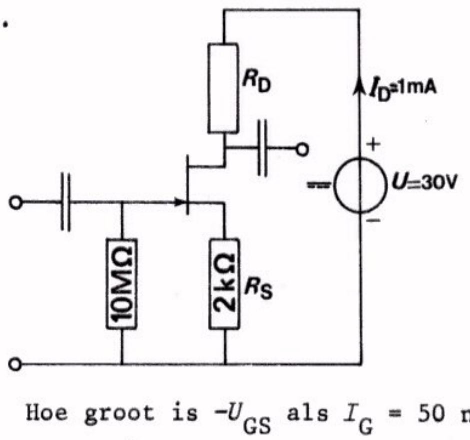
2.



Bereken: U_{GS} =

U_{DS} =

3.



Bereken U_{GS} als I_G te verwaarlozen klein is:

U_{GS} =

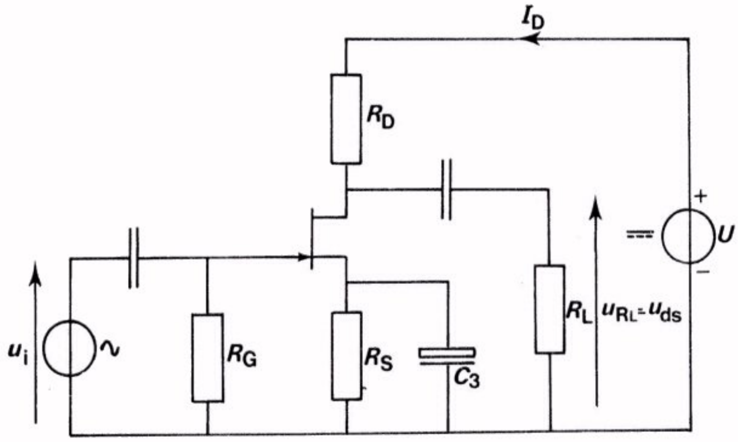
Hoe groot moet men R_D kiezen om over R_D evenveel gelijkspanning te verkrijgen als tussen D en S?

R_D =

Hoe groot is $-U_{GS}$ als I_G = 50 nA? U_{GS} =

HET VOLLEDIGE SCHEMA VAN EEN VERSTERKER MET EEN FET

Hier ziet u het volledige schema van een FET in GSS.



In deze schakeling is parallel aan R_s de ontkoppelcondensator C_3 aangebracht. Waarvoor dient deze? Denk nog eens terug aan de ontkoppelcondensator bij een transistor in GES.

De versterktrap is belast met een weerstand R_L. Voor wisselstroom staat deze parallel aan R_D. De wisselspanningsversterking is nu niet gelijk aan:

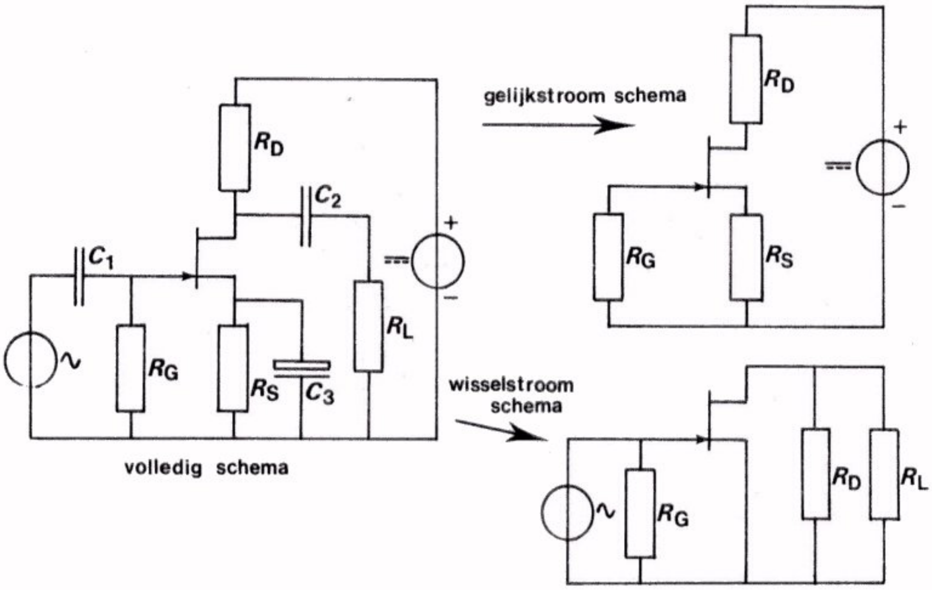
$$A_u = S \cdot R_D, \text{ maar aan}$$

$$A_u = S \cdot R_v.$$

Hierin is: $R_v = \dfrac{R_D \cdot R_L}{R_D + R_L}$.

HET GELIJKSTROOM- EN HET WISSELSTROOMSCHEMA

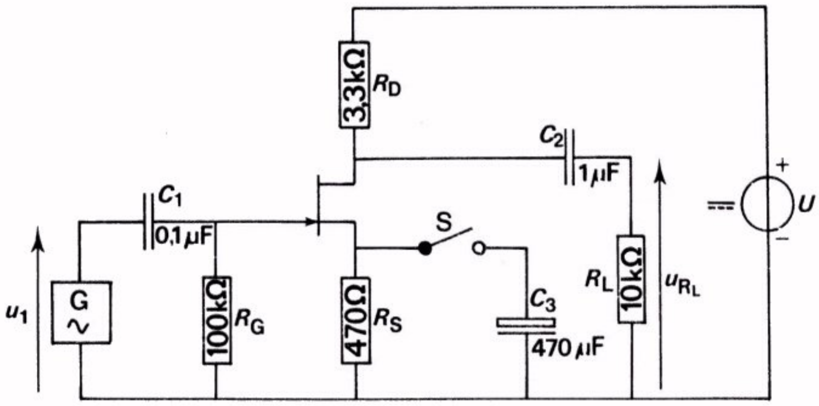
Bij de behandeling van de lagentransistor hebben we herhaaldelijk een kompleet schema opgesplitst in een gelijkstroom- en een wisselstroomschema. Dit heeft het voordeel dat men het gedrag van een schakeling voor gelijkstroom en voor wisselstroom goed van elkaar kan onderscheiden.
Hieronder ziet u hoe men ook een schakeling met een FET kan opsplitsen in een gelijkstroom en een wisselstroomschema.



Het gelijkstroomschema ontstaat door uit het volledige schema die delen waarin een condensator is opgenomen weg te laten. Condensators betekenen voor gelijkstroom immers oneindig grote weerstanden.

In het wisselstroomschema zijn de condensators als kortsluitingen beschouwd. Aangenomen is dus dat de reactanties van de condensators verwaarloosbaar klein zijn. Ook de gelijkspanningsbron is als volledige kortsluiting beschouwd.

OPDRACHT: METING AAN EEN FET IN GSS.



- Bouw deze schakeling.
- Sluit C_3 nog niet aan.
- Stel U in op 25 V. Schakel de LF-generator nog niet in.
- Meet met een universeelmeter U_{GS}. U_{GS} = [ ]
- Bereken nu I_D en U_{DS}. I_D = [ ]

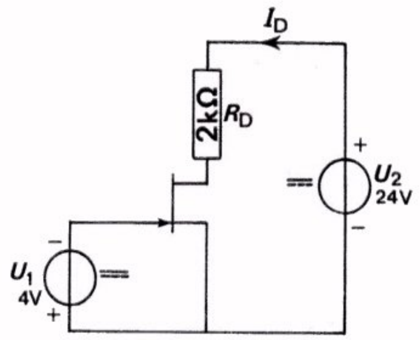
  U_{DS} = [ ]
- Controleer deze berekening door meting met een universeelmeter.
- Bepaal de wisselspanningsversterking zowel zonder als met de condensator C_3:

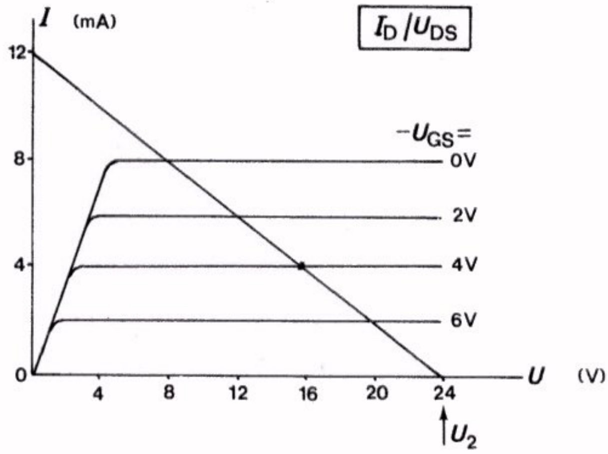
  Zonder C_3: A_u = [ ]

  Met C_3: A_u = [ ]
- Bepaal de fasedraaiing tussen uit- en ingangsspanning.

DE BELASTINGLIJN BIJ EEN FET MET AUTOMATISCHE NEGATIEVE GATESPANNING

Bij de lagentransistor en bij de FET hebben we gezien hoe we de belastinglijn in een bundel uitgangskarakteristieken moeten tekenen. Voor een schakeling met een aparte voedingsbron voor de gatespanning is dit hieronder nog eens gedaan.



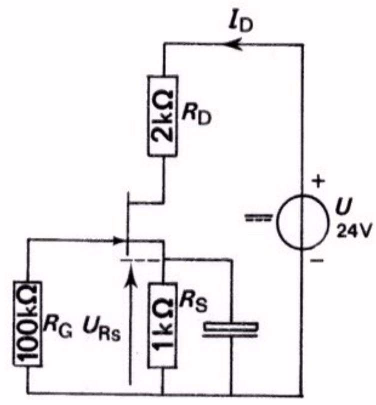


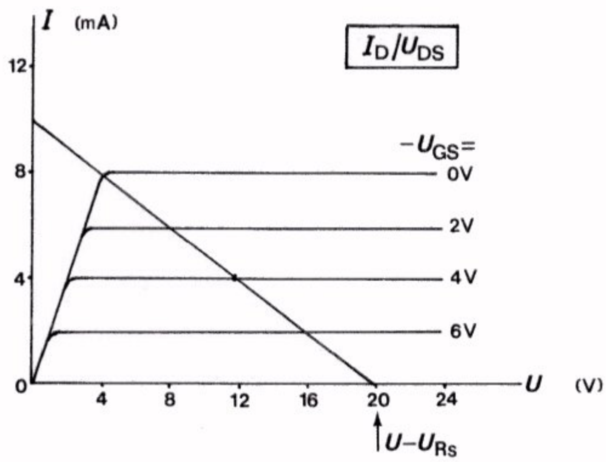
De voedingsspanning U_2 = 24 V en R_D = 2 kΩ. De belastinglijn begint bij U_{DS} = 24 V op de horizontale as en loopt naar

$$I_D = \frac{U_2}{R_D} = \frac{24}{2} = 12 \text{ mA}$$

op de verticale as.

In de schakeling waarbij de instelspanning van de gate automatisch tot stand komt loopt de belastinglijn iets anders. We leggen dit niet precies uit, maar vertellen alleen waar het op neer komt aan de hand van een voorbeeld.

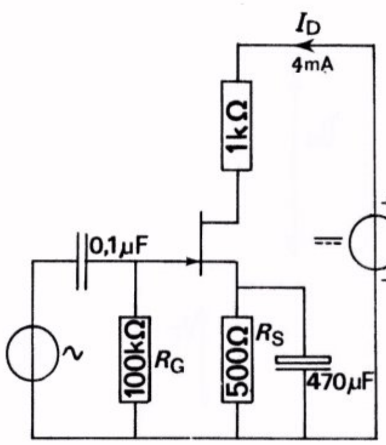


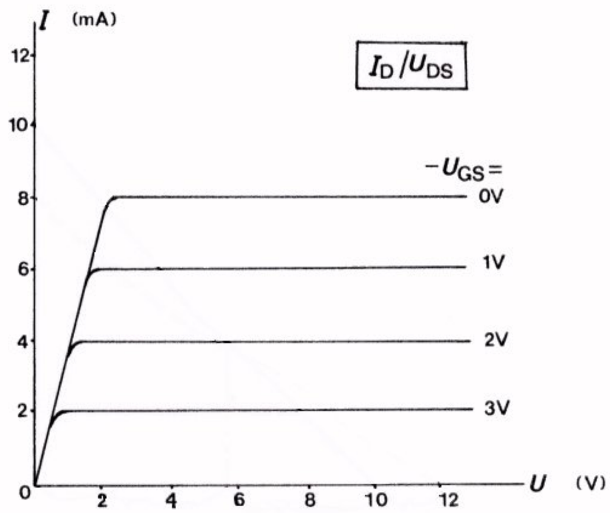


In deze schakeling staat een gedeelte van de voedingsspanning over de source-weerstand R_s. Dit betekent dat we de belastinglijn niet laten beginnen bij het punt U op de horizontale as, maar bij het punt $U - U_{RS}$. We verminderen de voedingsspanning dus eerst met de spanning over R_S. Daarna tekenen we de belastinglijn op de gewone wijze.

Voorbeeld: Als U = 24 V en $-U_{GS}$ = 4 V, dan begint de belastinglijn bij U_{DS} = 24 - 4 = 20 V. Als R_D = 2 kΩ, dan trekken we de belastinglijn naar het punt $\frac{20}{2}$ = 10 mA op de verticale as.

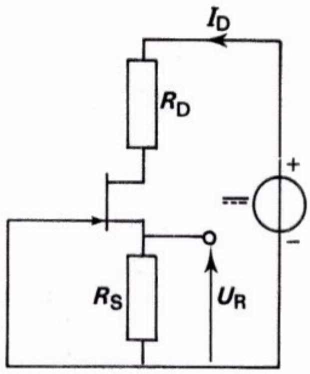
OEFENING





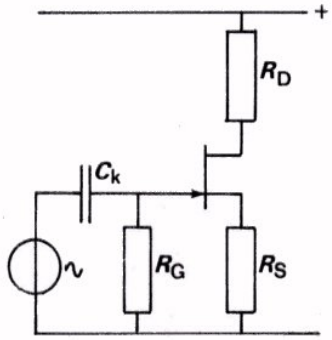
Van de FET in bovenstaande versterkschakeling zijn de uitgangskarakteristieken gegeven. De stroom I_D = 4 mA. Teken de belastinglijn in de uitgangskarakteristiek.

SAMENVATTING

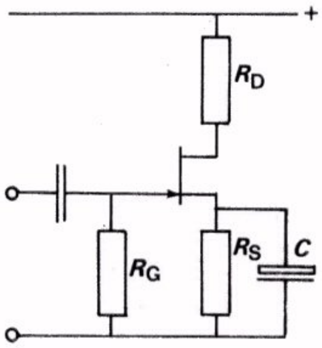
- 

Bij een praktische schakeling met een FET gebruikt men slechts één voedingsbron. De negatieve gate-spanning komt automatisch tot stand.

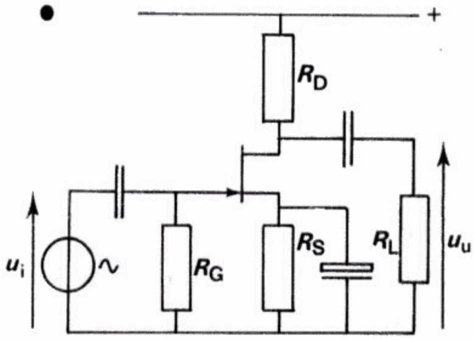
$$-U_{GS} = U_{RS} = R_S \cdot I_D.$$



Op de ingang van de FET sluit men een wisselspanning aan via een koppelcondensator. Verder is er een gate-weerstand R_G opgenomen die kortsluiting van de wisselspanning voorkomt.

- 

Parallel aan R_S wordt een grote ontkoppelcondensator opgenomen. Deze vormt een kortsluiting voor de wisselstroom en voorkomt vermindering van de wisselspanningsversterking.

- 

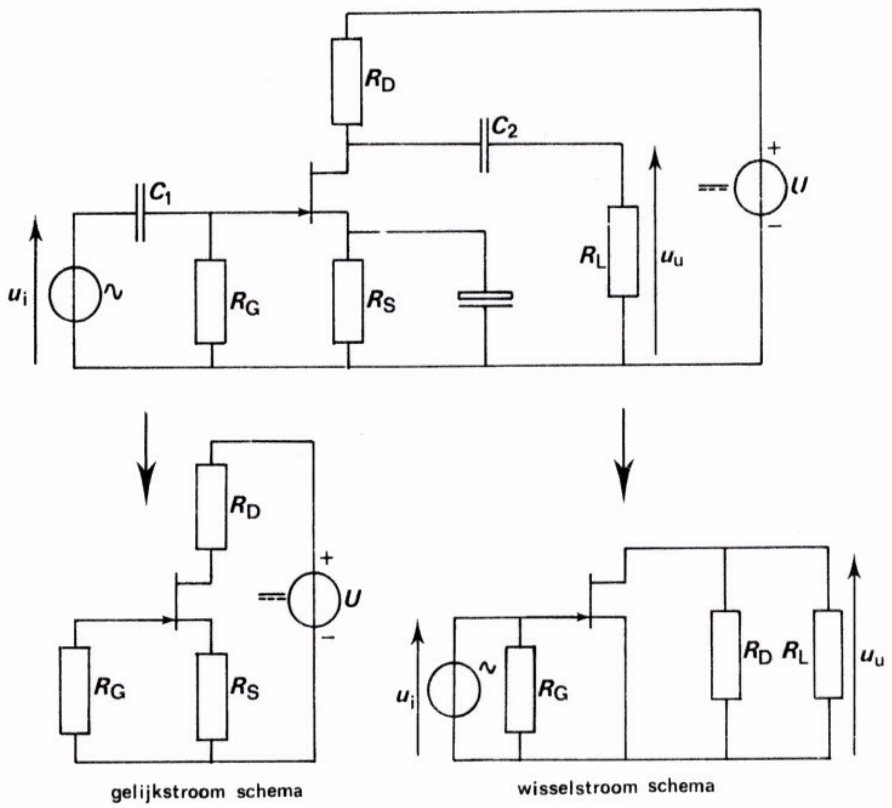
Indien de versterktrap belast is met een weerstand R_L, dan is de totale belasting van de FET

$$R_v = \frac{R_D \cdot R_L}{R_D + R_L}.$$

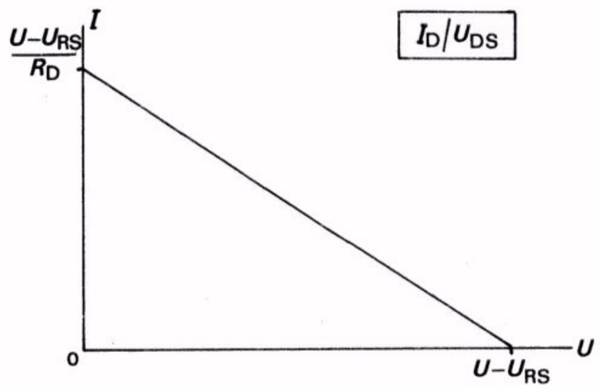
De wisselspanningsversterking bedraagt dan:

$$A_u = \frac{u_u}{u_i} = S.R_v.$$

● Dit is een volledig schema van een FET in GSS. Het is opgesplitst in een gelijkstroom- en een wisselstroomschema.



● In de bundel uitgangskarakteristieken tekent men vaak de belastinglijn. Bij aanwezigheid van een ontkoppelde R_S moet men deze lijn laten beginnen bij een spanning $U - U_{RS}$ op de U-as; hij eindigt dan bij de stroom $\frac{U - U_{RS}}{R_D}$ op de I-as.

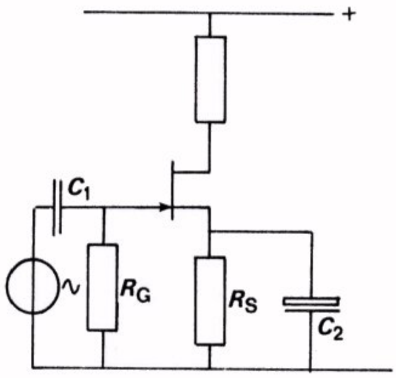


NAAM:

KLAS:

OEFENINGEN

1.



Hiernaast ziet u de ingangsschakeling van een wisselspanningsversterker.

Als over R_G een kortsluiting ontstaat, dan:

- trekt de gate geen stroom meer O
- gaat er een te grote stroom door de gate O
- verandert de instelling van de FET O
- wordt het ingangssignaal kortgesloten O

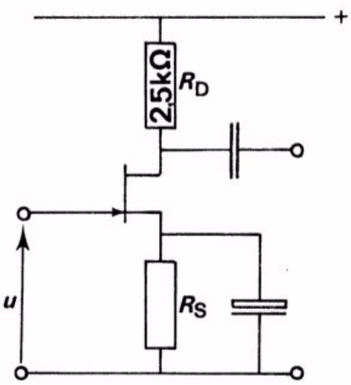
Waarvoor dient C_2?

C_2 voorkomt dat door het aanbrengen van R_S de versterking vermindert.

Zonder C_2 treedt er vervorming op.

Zonder C_2 kan er geen wisselstroom door de FET lopen.

2.



Bij deze FET-schakeling geldt:

$S = 4$ mA/V.

Aan de ingang staat een wisselspanning $U_t = 300$ mV.

Bereken:

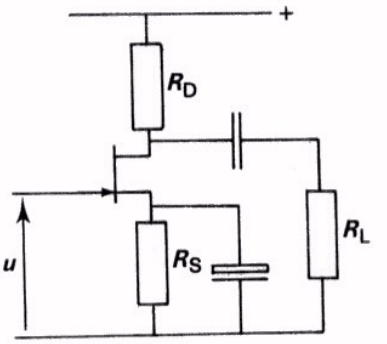
I_{dt} =

U_{dt} =

A_u =

3. De schakeling uit het voorafgaande wordt belast met een weerstand R_L = 10 kΩ.

Bereken wederom:

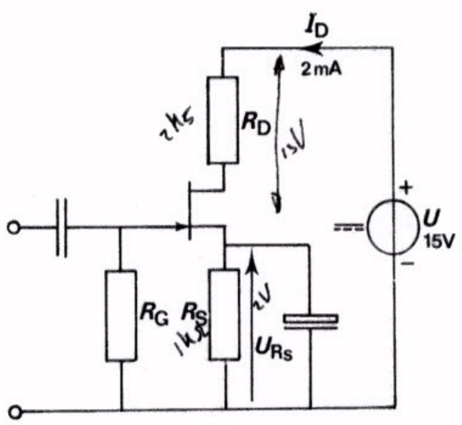


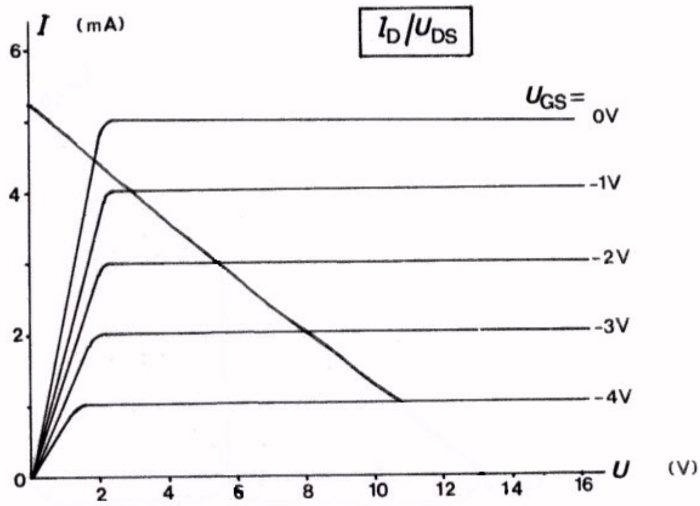
I_{dt} =

U_{dt} =

A_u =

4.





Teken de belastinglijn voor deze schakeling. Bepaal het werkpunt W.

$U_{(GS)W}$ =

$U_{(DS)W}$ =

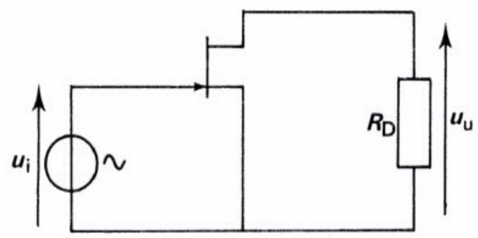
B 224

DE SOURCEVOLGER

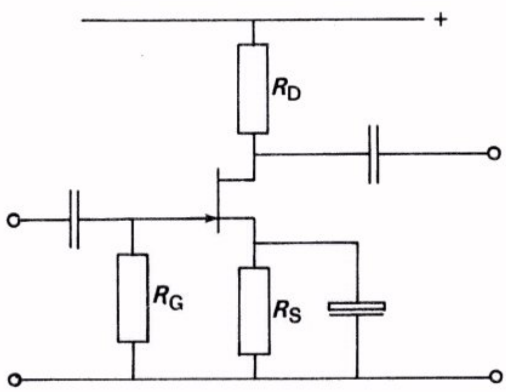
NOG ENIGE BIJZONDERHEDEN OVER DE FET

INLEIDING

In de voorafgaande lessen is de FET besproken en toegepast als versterkende component. We hebben daarbij de gemeenschappelijke source schakeling (GSS) behandeld. We geven hier nog eens het eenvoudige wisselstroomschema:



Een volledig schema zoals dit in de praktijk wordt toegepast ziet u hier:

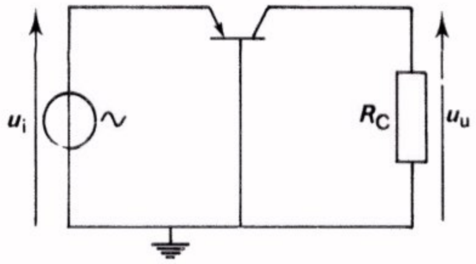


Deze schakeling vertoont grote overeenkomst met de GES bij de lagentransistor, die daar ook de meest toegepaste schakeling is.

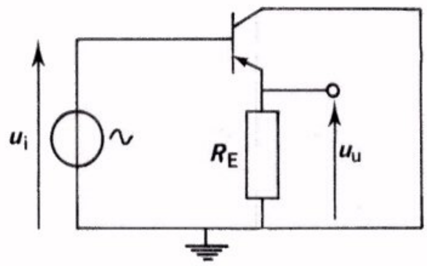
DE ANDERE GRONDSCHAKELINGEN

Bij de lagentransistor maakten we kennis met nog twee andere schakelingen, die beide worden toegepast. We geven ze hier nog eens:

Eenvoudig wisselstroomschema
GBS

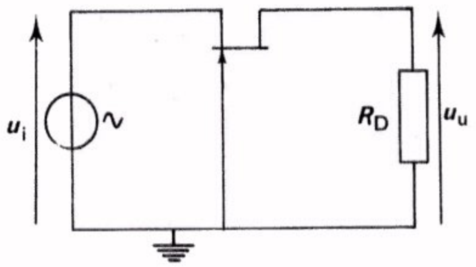


Eenvoudig wisselstroomschema
GCS
of emittervolger

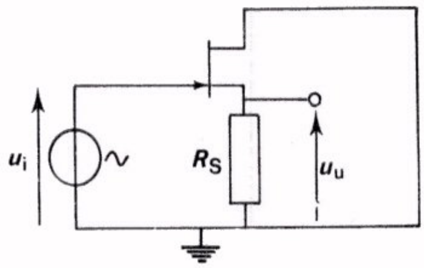


Met een FET zijn overeenkomstige schakelingen mogelijk. Hier volgen ze in hun meest eenvoudige vorm:

Eenvoudig wisselstroomschema
GGS



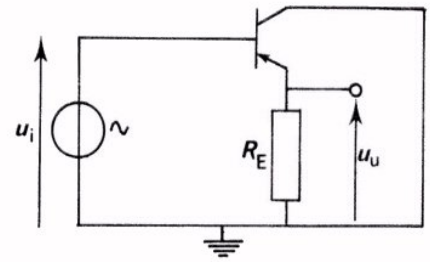
Eenvoudig wisselstroomschema
GDS
of *sourcevolger*



De GGS wordt vrijwel nooit toegepast. We bespreken deze verder niet. De sourcevolger vindt wel toepassing en daarom gaan we er in deze les enige aandacht aan schenken.

DE SOURCEVOLGER

Hier ziet u nog eens een lagenstransistor geschakeld als emittervolger. We hebben indertijd gezien dat de wisselspanningsversterking iets kleiner was dan 1.



Precies gold:

$$A_u = \frac{S \cdot R_E}{1 + S \cdot R_E}$$

S = steilheid (A/V)

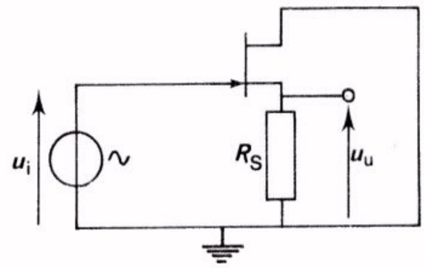
R_E = emitterweerstand (Ω).

Bovendien zijn u_u en u_i in fase.

De sourcevolger vertoont sterke overeenkomsten.

Ook hier geldt:

$$A_u < 1.$$



In formule:

$$A_u = \frac{S \cdot R_S}{1 + S \cdot R_S}$$

S = steilheid (A/V)

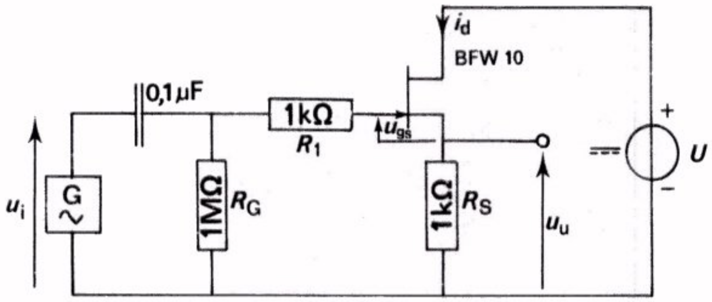
R_S = sourceweerstand (Ω).

Ook hier zijn u_u en u_i in fase.

Opmerking:

De steilheid S is bij de FET veel kleiner dan bij de lagentransistor. Dit betekent dat A_u bij de sourcevolger de waarde 1 minder goed benadert dan bij de emittervolger.

OPDRACHT: METING VAN A_u BIJ DE SOURCEVOLGER



- Bouw deze sourcevolger op uw paneel.
- Stel de voedingsspanning U in op 10 V.
- Controleer de schakeling door meting van U_{GS}.

$-U_{GS}$ = [ ]

- Voer een wisselspanning toe: U_{it} = 1 V bij 1 kHz. Trigger de oscilloscoop met de ingangsspanning en meet de uitgangswisselspanning.

U_{ut} = [ ]

- Bereken nu de wisselspanningsversterking:

A_u = [ ]

- Bepaal de fase van u_u ten opzichte van u_i.

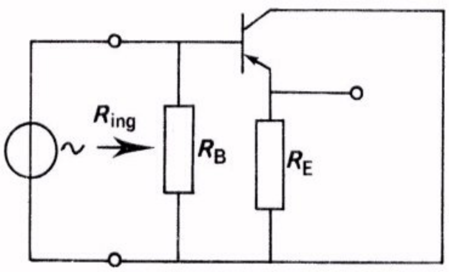
u_u is in | fase / tegenfase | met u_i.

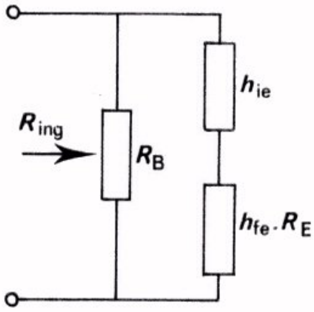
CONCLUSIE

- A_u is bij de sourcevolger kleiner dan 1.
- Uitgangs- en ingangswisselspanning zijn in fase.

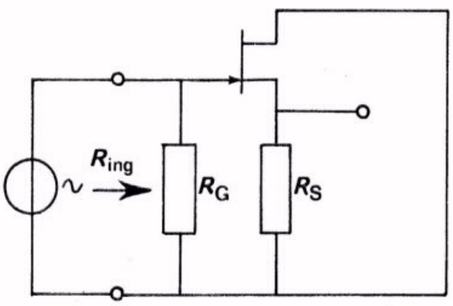
DE INGANGSWEERSTAND VAN DE SOURCEVOLGER

We vroegen ons bij de emittervolger reeds af wat de zin was van een schakeling met een versterking kleiner dan 1. We zagen toen dat het nut van de emittervolger was, dat hij een hoge ingangsweerstand en een lage uitgangsweerstand had. We herhalen zeer kort nog eens wat we over de ingangsweerstand van de emittervolger hebben geleerd.





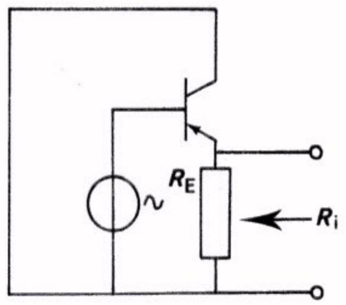
Hier geldt dat R_{ing} bestaat uit de parallelschakeling van R_B en (h_{ie} + h_{fe} . R_E).



Bij de sourcevolger is de ingangsweerstand: $R_{ing} \approx R_G$

Parallel aan R_G staat immers de FET met een zeer hoge ingangsweerstand, 100 MΩ b.v. Maakt men b.v. R_G = 10 MΩ, dan heeft ook de ingangsweerstand van de schakeling deze waarde.

DE UITGANGSWEERSTAND VAN DE SOURCEVOLGER



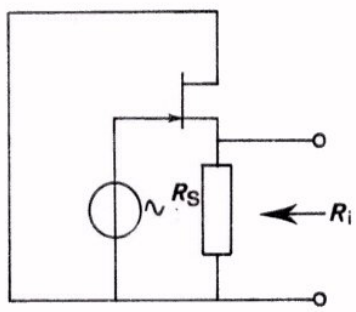
De uitgangsweerstand van een schakeling is hetzelfde begrip als de inwendige weerstand van een spanningsbron.
We hebben gezien dat de uitgangsweerstand van de emittervolger zeer klein is. Hij is gelijk aan de parallelschakeling van $\frac{1}{S}$ en R_E.

$$R_i = \frac{\frac{1}{S} \cdot R_E}{\frac{1}{S} + R_E}.$$

Aangezien $\frac{1}{S}$ bij een lagentransistor praktisch veel kleiner is dan R_E, kan men stellen dat:

$$R_i \approx \frac{1}{S}.$$

Ga dit na.



De uitgangsweerstand van de sourcevolger is ook klein. Hij is gelijk aan de parallelschakeling van $\frac{1}{S}$ en R_S, dus:

$$R_i = \frac{\frac{1}{S} \cdot R_S}{\frac{1}{S} + R_S} = \frac{R_s}{1 + S.R_s}$$

S is bij de FET lang niet zo groot, zodat $\frac{1}{S}$ niet veel kleiner is dan R_S.
De benadering die hierboven bij de lagentransistor werd toegepast, is hier dan ook niet toegestaan.

OEFENINGEN

We vatten nog eens samen. Bij de sourcevolger (GDS):

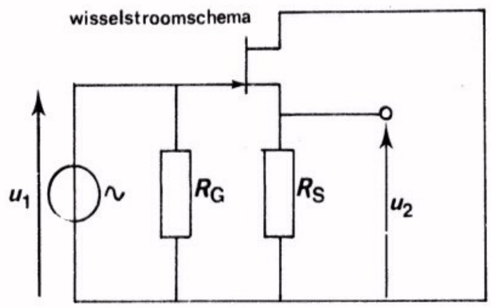
$$\boxed{A_u = \frac{S \cdot R_S}{1 + S \cdot R_S}}$$ Dit is kleiner dan 1.

$$\boxed{R_{ing} \approx R_G}$$ Zeer groot.

$$\boxed{R_i = \frac{\frac{1}{S} \cdot R_S}{\frac{1}{S} + R_S} = \frac{R_S}{1 + SR_S}}$$ Klein.

Let wel $A_u = SR_i$

1.



Gegeven is: $R_S = 600\ \Omega$

$R_G = 10\ \text{M}\Omega$

$S = 2{,}5\ \text{mA/V}$.

Bereken hiermee:

$A_u = \frac{u_2}{u_1}$ $\qquad A_u = \boxed{}$

de uitgangsweerstand R_i

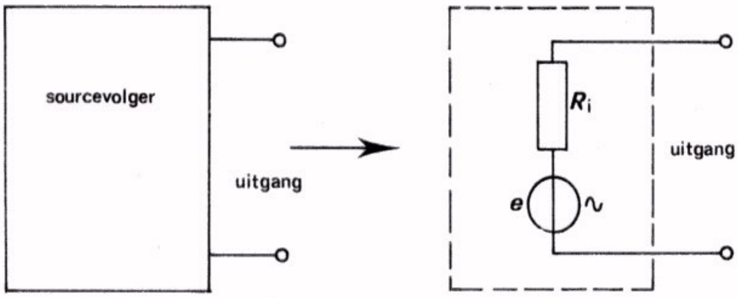
$R_i = \boxed{}$

2. In vorig vraagstuk belast men vervolgens de sourcevolger met een grote condensator in serie met een weerstand van 240 Ω .
Bereken opnieuw:

$A_u = \frac{u_2}{u_1}$ $\qquad A_u = \boxed{}$

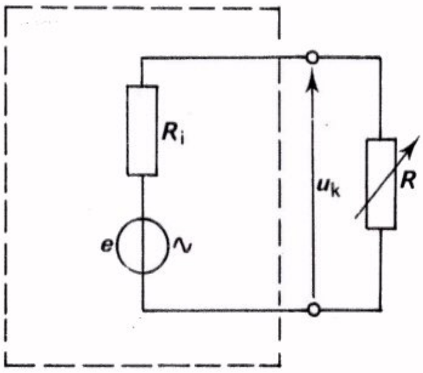
HET METEN VAN DE UITGANGSWISSELSTROOMWEERSTAND VAN EEN SOURCEVOLGER

Aan de uitgang van een sourcevolger "zien" we een wisselspanningsbron met EMK e en een inwendige weerstand R_i.



De R_i is de uitgangsweerstand van de sourcevolger.

De R_i is te meten door de sourcevolger met een variabele R te belasten en te zorgen dat de klemspanning u_k gelijk is aan ½ e. Dan is $R_i = R$.

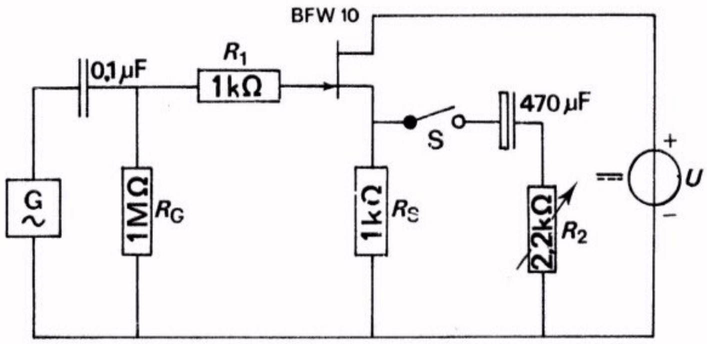


Als $u_k = \frac{1}{2}$ e,
dan
$R_i = R$.

Door tenslotte de weerstand R los te maken uit de schakeling en zijn waarde met een ohmmeter te meten is $R_i = R$ te bepalen.

In volgende opdracht gaan we dit doen.

OPDRACHT: METING VAN DE UITGANGSWISSELSTROOMWEERSTAND



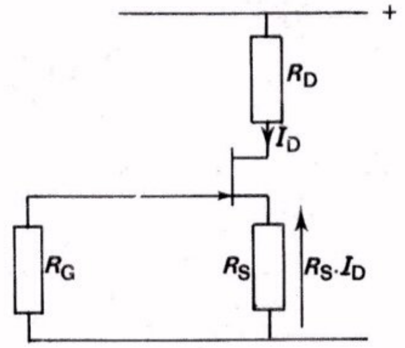
- Breid de schakeling op uw paneel uit volgens bovenstaand schema.
- Houd S open.
- Schakel de voedingsspanning in en regel deze op 10 V.
- Voer een wisselspanning toe bij een frequentie van 1 kHz. Maak deze zo groot dat de uitgangswisselspanning 100 mV bedraagt.
- Sluit S vervolgens en regel de uitgangsspanning door middel van R_2 tot $U_{u(eff)}$ = 50 mV, meet de R_2-waarde.

De uitgangsweerstand R_{uit} = ______

- Schakel de voedingsspanning uit.

DE R_S - LIJN

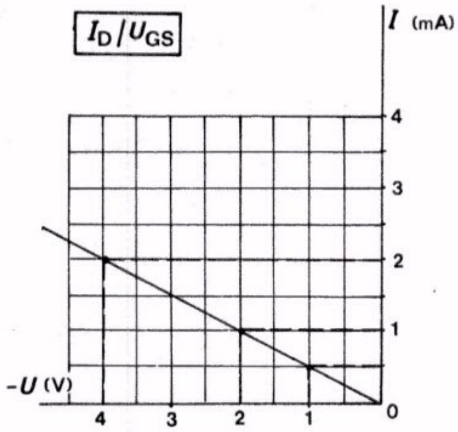
We keren nu terug naar de geaarde source schakeling. Deze wordt gewoonlijk automatisch van zijn instelspanning U_{GS} voorzien door middel van R_S.



Als de I_D - U_{GS} - karakteristiek en R_S zijn gegeven, kunnen we de instelling van de FET grafisch bepalen met behulp van de R_S - *lijn*. De R_S-*lijn* is niets anders dan een karakteristiek van de weerstand R_S. Deze laat zien hoe groot de spanning $R_S \cdot I_D$ over R_S is bij verschillende waarden van I_D.

Is R_S = 2 kΩ, dan geldt:

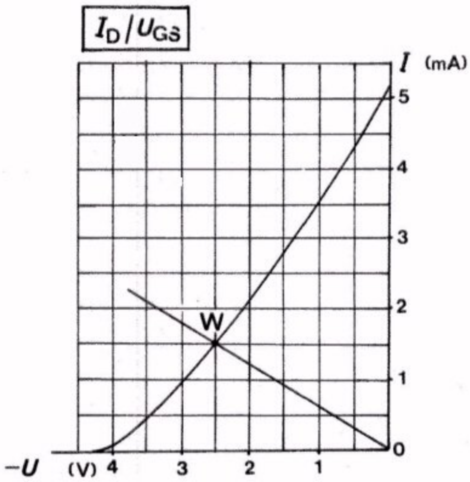
I_D = 0 mA,	$R_S \cdot I_D$ = 0 V
= 0,5 mA,	= 1 V
= 1 mA,	= 2 V
= 2 mA,	= 4 V.



Tekenen we de I_D - U_{GS} - karakteristiek en de R_S - lijn in één figuur, dan is het instelpunt W het snijpunt van deze lijnen.

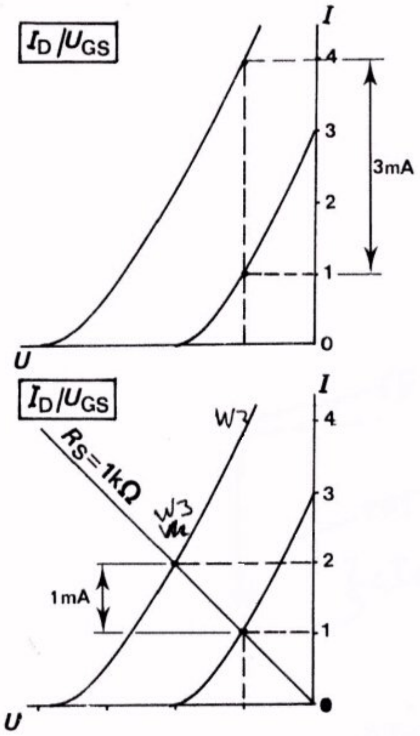
Vraag.
Hoe groot is R_S in nevenstaand voorbeeld?

R_S = ☐



BESTRIJDING VAN DE SPREIDING

Bij een opdracht in de eerste FET-les hebt u zelf al gemerkt dat de eigenschappen van FET's van eenzelfde type sterk uiteen kunnen lopen. Dit wordt vooral veroorzaakt door het feit dat de I_D - U_{GS} - karakteristieken nogal verschoven kunnen liggen.



Dit is uiteraard lastig. Stel maar eens dat u een bepaalde U_{GS} aanbrengt, dan is de I_D bij diverse exemplaren verschillend. In nevenstaand voorbeeld is het verschil 3 mA.

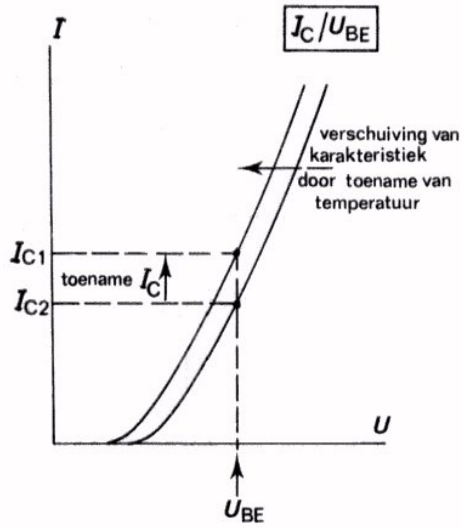
Brengen we U_{GS} automatisch aan door middel van R_S, dan wordt de invloed van de spreiding veel kleiner.
Dit kunnen we gemakkelijk inzien met behulp van de zojuist behandelde R_S - lijn.

In dit voorbeeld R_S = 1 kΩ. Het verschil van 3 mA is nu teruggebracht tot 1 mA.

Opmerking:
Net zoals R_E bij de lagentransistor de invloed van spreiding vermindert, doet het aanbrengen van R_S dit bij de FET.

INVLOED VAN DE TEMPERATUUR

Bij de lagentransistor verschuift de overdrachtskarakteristiek bij verandering van de temperatuur.
Bij een vaste instelspanning U_{BE} heeft dit een toename van de hoofdstroom I_C ten gevolge. Ook dit ongewenste effect wordt bestreden door het aanbrengen van R_E. We noemden dit de stabiliserende werking van R_E op de grootte van I_C.



Ook de FET is gevoelig voor temperatuursinvloed. De aanwezigheid van R_S bij de FET maakt deze minder gevoelig voor de temperatuur. Er heeft dan een stabiliserende werking van R_S op de grootte van I_D plaats.

Samenvattend kan men dus zeggen, dat R_S:

- zorgt voor automatisch negatieve U_{GS},
- de spreidingsinvloed vermindert,
- de temperatuurinvloed vermindert.

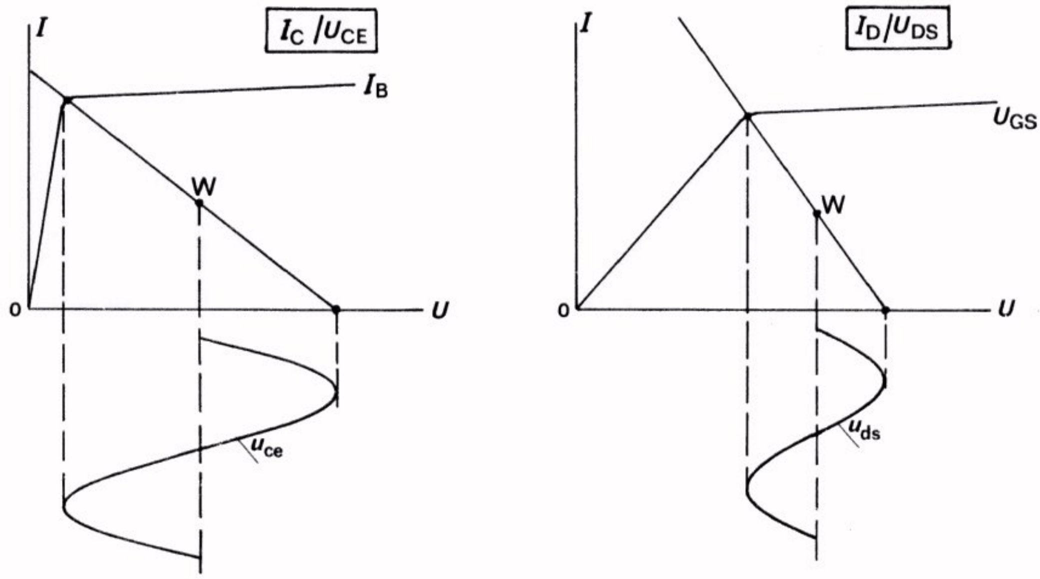
VERGELIJKING VAN LAGENTRANSISTOR EN FET

Tenslotte gaan we FET en lagentransistor vergelijken.

- Voordelen van de lagentransistor.

  - De steilheid S is veel groter, b.v. 500 mA/V. Bij de FET minder dan 10 mA/V. Met een GES is dus een veel grotere versterking $S \cdot R_C$ te bereiken dan de versterking $S \cdot R_D$ bij de GSS.

  - De uitgangskarakteristieken van de lagentransistor lopen tot dicht bij de verticale as, vrijwel horizontaal. Bij de FET buigen zij verder van de I-as al scherp naar beneden.



Dit wil zeggen dat men met een even grote voedingsspanning U bij de lagentransistor een grotere onvervormde u_{ce} kan verkrijgen dan een u_{ds} bij de FET. Men zegt, dat men de lagentransistor *verder* kan *uitsturen.*

- Voordelen van de FET

  - We hebben al opgemerkt dat de ingangsweerstand van een FET veel hoger is dan die van een lagentransistor. De hoge R_{ing} van een schakeling met een FET is een belangrijk voordeel. Met een hoge ingangsweerstand belast men een voorafgaande wisselspanningsbron namelijk veel minder sterk. Dit is bijvoorbeeld van belang aan de ingang van een gevoelige versterker.

- De FET veroorzaakt veel minder *ruis*.

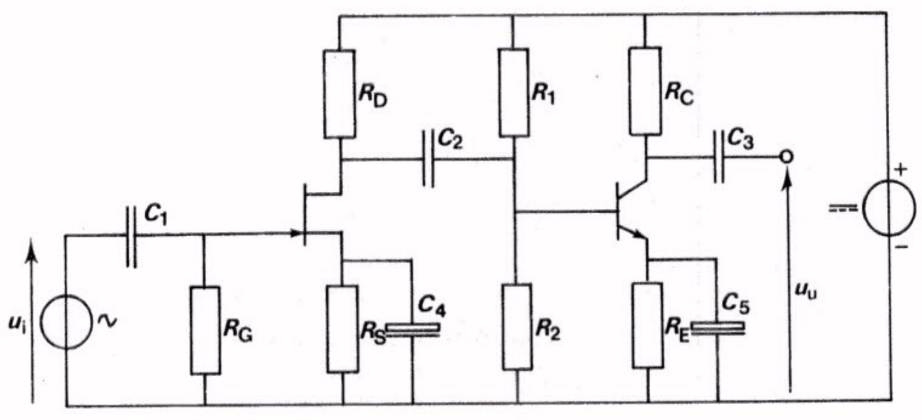
  Wat is "ruis" ook al weer?
  Als men een gelijkstroom door een *weerstand* stuurt, dan blijkt deze altijd toch enigszins te variëren. Daardoor ontstaat over de weerstand behalve een gelijkspanning een kleine grillig variërende wisselspanning. Deze wisselspanning noemt men de "ruisspanning", of kortweg de "ruis".

  Bij een *lagentransistor* treden ook van deze grillige spanningsvariaties op. Doordat de hoofdstroom I_C een PN-overgang passeert, treedt er nog extra ruis op!

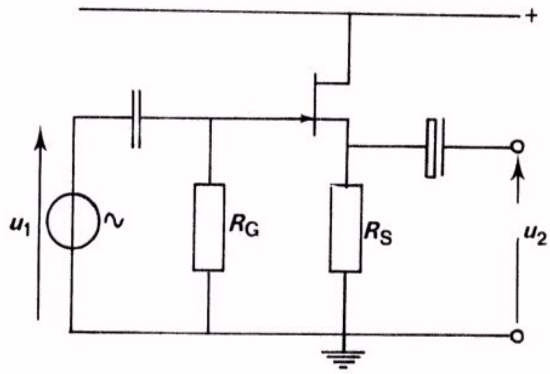
  Bij een FET loopt de hoofdstroom I_D niet door een PN-overgang. Daarom heeft de FET *veel minder ruis* dan een lagentransistor. Immers, de aan de PN-overgang te wijten extra ruis treedt niet op. De minder grote ruis van de FET is zijn belangrijkste voordeel.

Het optreden van ruis is van belang als zeer kleine spanningen (µV) verwerkt moeten worden. Dit is het geval aan de ingang van gevoelige versterkers, waar het te verwerken signaal nog klein is. Daarom begint men zo'n versterker vaak met een FET, om daarna op lagentransistors over te gaan.

Hieronder ziet u een voorbeeld van een complete schakeling van een tweetrapsversterker met een FET aan de ingang, gevolgd door een lagentransistor.



SAMENVATTING

- 

De *sourcevolger* is te vergelijken met de emittervolger.

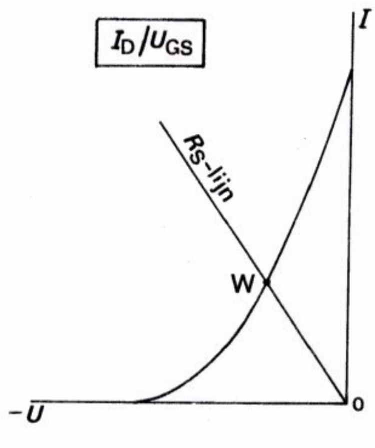
- $A_u = \frac{u_2}{u_1} = \frac{S \cdot R_S}{1 + S.R_S} < 1.$

- u_2 is in fase met u_1.

- $R_{ing} \approx R_G$ is zeer groot.

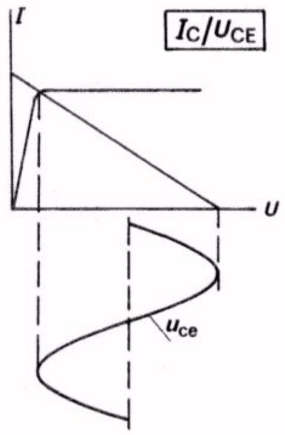
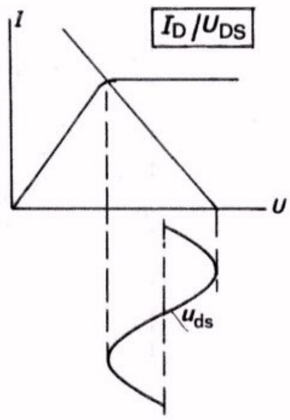
- De uitgangsweerstand:

$$R_i = \frac{\frac{1}{S} \cdot R_S}{\frac{1}{S} + R_S} \text{ is klein.}$$

- 

De R_S-lijn geeft hoe groot de spanning $R_S \cdot I_D$ over de R_S is. Het is een gewone weerstandskarakteristiek. Uit de $I_D - U_{GS}$ - karakteristiek en de R_S - lijn volgt hoe de FET zich zal instellen. Namelijk in het snijpunt W.

- FET's van eenzelfde type vertonen *spreiding*. Deze wordt door R_S bestreden.
- FET's zijn gevoelig voor temperatuursverandering. R_S stabiliseert voor temperatuur.
- Vergelijking lagentransistor en FET.

Lagentransistor	FET
Grote S, zodat $A_u = S \cdot R_C$ groot is in een GES.	Kleine S, zodat $A_u = S \cdot R_D$ niet groot is in een GSS.
Is tot grotere u_{ce} - waarden uit te sturen.  	Is tot minder grote u_{ds} - waarden uit te sturen. 
Vanwege ruis minder geschikt voor verwerking van zeer kleine signalen.	Geeft minder ruis. Daardoor beter geschikt voor verwerking van zeer kleine signalen.
Heeft geen grote ingangsweerstand bij de GES.	Kan zéér grote ingangsweerstand hebben bij de GSS.

NAAM: | | **KLAS:** | |

OEFENINGEN

1. Een FET is geschakeld als sourcevolger. De steilheid $S = 4$ mA/V. De sourceweerstand bedraagt $R_S = 250\ \Omega$.

De uitgangsweerstand bedraagt:

	1000 Ω	O
	500 Ω	O
	250 Ω	O
	125 Ω	O

De versterking A_u bedraagt:

	> 1	O
	1	O
	0,9	O
	0,5	O

2. Een voordeel van een FET ten opzichte van een lagentransistor is:

de FET kan grotere wisselspanningen verwerken. O
de FET kan beter zeer kleine wisselspanningen versterken. O
de FET is veel minder afhankelijk van spreiding. O
de FET versterkt meer. O

3. De source-weerstand in een GSS dient *niet* om:

de spreidingsinvloed te verminderen. O
de temperatuurafhankelijkheid te verminderen. O
de wisselspanningsversterking te verminderen. O
automatische U_{GS} te verzorgen. O

4. Waarom past men na een versterktrap met een FET meestal versterktrappen met lagentransistors toe?

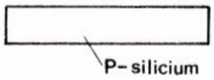
B 225

D E   M O S - T R A N S I S T O R   O F   M O S T

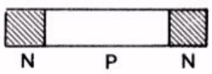
INLEIDING

In de voorafgaande lessen hebben we de FET behandeld. In deze les schenken we nog enige aandacht aan een halfgeleidercomponent die gelijkenis vertoont met de veldeffect transistor, de zogenaamde MOS-transistor of MOST. Om de naam van deze nieuwe component te kunnen verklaren, moeten we eerst iets zeggen over zijn opbouw.

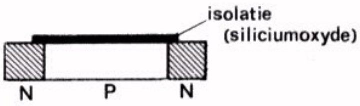
Opbouw van een MOST.



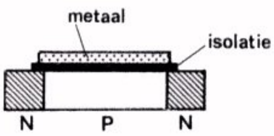
In gedachten gaan we uit van een stukje P-silicium. Dit uitgangsmateriaal noemen we *substraat* of ook wel *bulk*.



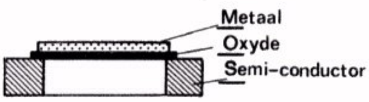
De uiteinden van de bulk zet men om in N-silicium.



Aan de bovenzijde van de bulk wordt vervolgens een isolerend laagje silicium-oxyde aangebracht.



Op deze isolatie wordt een dunne laag metaal aangebracht. Meestal gebruikt men hiervoor aluminium.

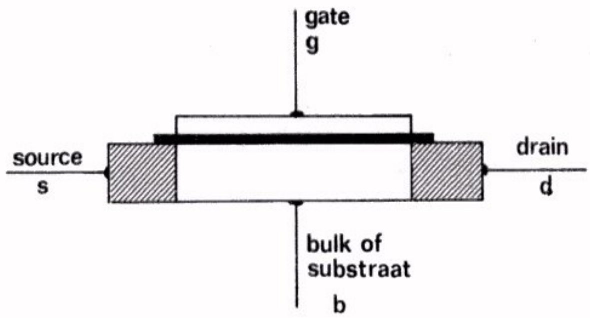


Van boven naar beneden is dus achtereenvolgens aanwezig:

Metaal, Oxyde, Semiconductor

"Semiconductor" betekent "halfgeleider". De beginletters vormen het woord MOS, waaraan deze transistor zijn naam MOS-Transistor of MOST dankt.

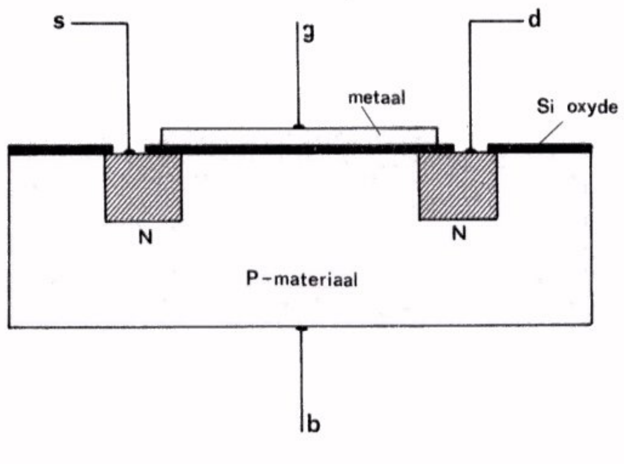
AANSLUITINGEN



Hier ziet u nogmaals de opbouw van een MOST. Nu zijn ook de aansluitingen getekend. De benamingen komen overeen met die van de FET.

Tussen source en drain loopt de hoofdstroom; de gate is de stuurelektrode. De MOST heeft nog een vierde aansluiting. Deze is verbonden met de bulk en wordt aangeduid met de letter b.

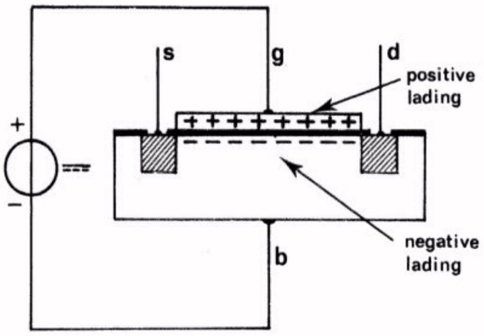
DE PRAKTISCHE OPBOUW VAN DE MOST.



Hier ziet u sterk vergroot de werkelijke opbouw van een MOST in doorsnede. In de figuur vindt u het P-materiaal, de N-gebiedjes, het siliciumoxydelaagje en de metaallaag terug.

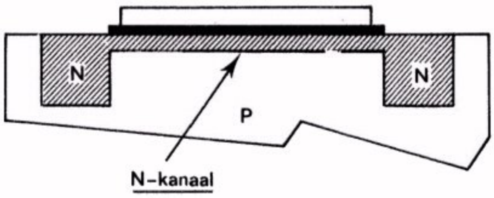
In de werkelijkheid zijn de afmetingen van een MOST zeer gering. Om u enig idee te geven: de afstand tussen de beide N-silicium-gebiedjes is ongeveer 10 µm = 0,01 mm.

HET GEDRAG VAN DE MOST



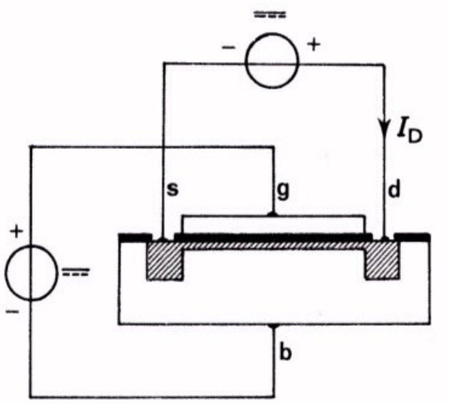
We sluiten de gate aan op de + en de bulk op de - van een gelijkspanningsbron. Aan weerszijden van het isolerende oxydelaagje verzamelt zich daardoor positieve, respectievelijk negatieve lading.

In het P-materiaal ontstaat daardoor onder het isolerend laagje een gebiedje met elektronen (N-materiaal) dat gemakkelijk geleidt.



Deze geleidende N-laag wordt *N-kanaal* genoemd.

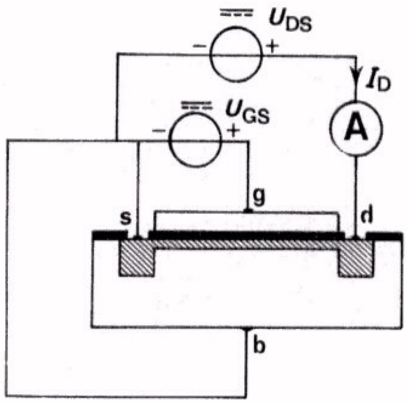
Sluit men een tweede gelijkspanningsbron aan tussen drain en source, dan vloeit er een stroom I_D (drainstroom) door dit kanaal.



Vergroot men de positieve spanning op de gate, dan wordt het kanaal breder en I_D wordt groter.
Verlaagt men de spanning op de gate, dan wordt I_D kleiner. De drainstroom wordt reeds nul als er nog een kleine positieve spanning op de gate aanwezig is. Deze gate-spanning heet *drempelspanning*. Men duidt hem aan met U_T (T van het engelse woord: "threshold" = drempel).

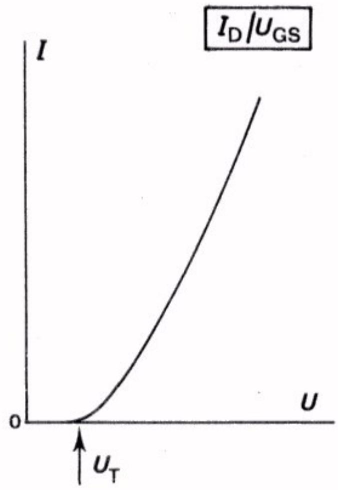
DE OVERDRACHTSKARAKTERISTIEK

Evenals bij de FET geeft de overdrachtskarakteristiek van de MOST het verband tussen de uitgangsstroom I_D en de ingangs- of stuurspanning U_{GS}.



Hier ziet u een schakeling waarmee de I_D - U_{GS} - karakteristiek gemeten kan worden. Deze meting verloopt net zo als de reeds uitgevoerde meting van de FET-overdrachtskarakterstiek. Daarom gaan we hem niet uitvoeren. U zult wel ter kennisgeving aan willen nemen dat de karakteristiek verloopt zoals hieronder is geschetst.

Bij negatieve waarden van U_{GS} loopt er geen stroom. Pas als er een bepaalde positieve spanning (de drempelspanning) U_T op de gate aanwezig is, gaat er een drainstroom I_D lopen. Bij vergroting van de gate-spanning wordt het kanaal breder en neemt I_D toe.



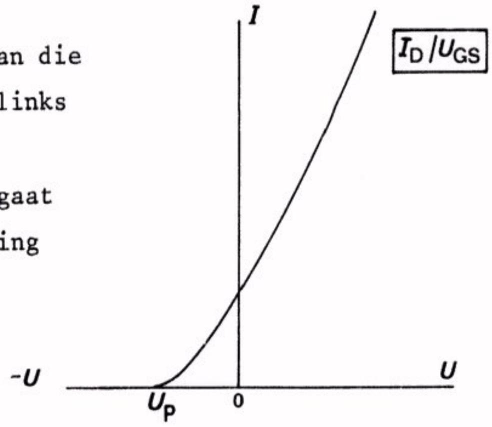
We hebben nu één type MOST met zijn overdrachtskarakteristiek besproken. Er zijn echter nog andere typen. Deze komen op de volgende bladen ter sprake.

ANDER TYPE MOST MET N-KANAAL.

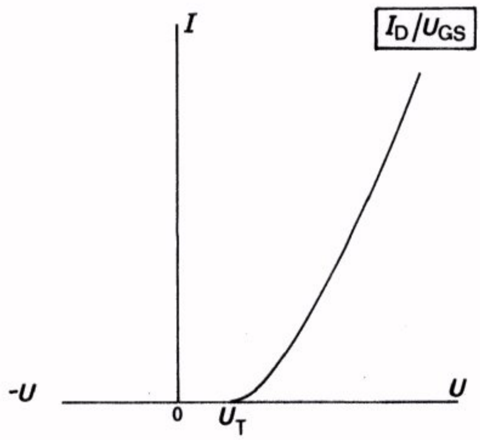
De MOST kan ook zo gemaakt worden dat er reeds bij een negatieve waarde van U_{GS} een stroom I_D loopt. De overdrachtskarakteristiek ziet er dan als volgt uit.

Deze karakteristiek is ten opzichte van die op het vorige blad als het ware naar links verschoven.

De gate-spanning waarbij drainstroom gaat lopen, noemt men hier de afknijpspanning U_P (pinch off = afknijpen).



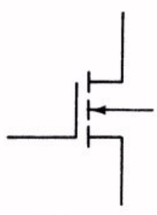
In de praktijk duidt men de MOST's met deze verschillende overdrachtskarakteristieken aan als het *verrijkings*type en het *verarmings*type. Hoe komt men aan deze namen? We kunnen dit het handigste inzien door in de overdrachtskarakteristieken te letten op wat er aan de hand is bij een gate- of stuurspanning nul.



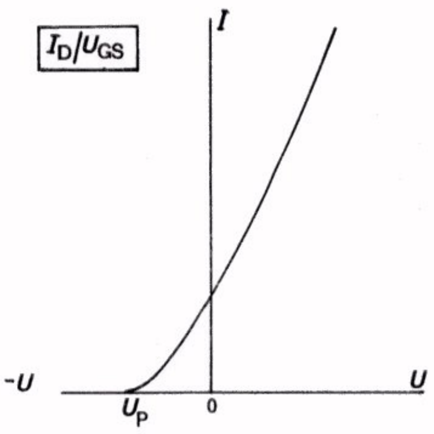
Hier is er bij $U_{GS} = 0$ geen stroom I_D. Men moet U_{GS} positief maken om te bereiken dat er wel stroom gaat lopen.

Door het aanbrengen van een positieve spanning brengt men een aantal beweegelijke ladinkjes aan. Men zegt dat de MOST daardoor verrijkt wordt met bewegelijke ladinkjes. Een type met deze karakteristiek noemt men daarom een *verrijkingstype*.

Het symbool voor de n-kanaal MOS transistor van het verrijkingstype is:

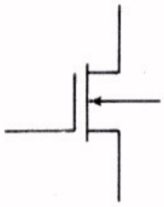


N- kanaal



Bij dit andere type moet men U_{GS} negatief maken om het punt $I_D = 0$ in de karakteristiek te bereiken. Bij $U_{GS} = 0$ zijn bewegelijke ladinkjes aanwezig en door het aanbrengen van negatieve spanning maakt men de MOST armer aan die ladinkjes. Een type met deze karakteristiek noemt men daarom een *verarmingstype*.

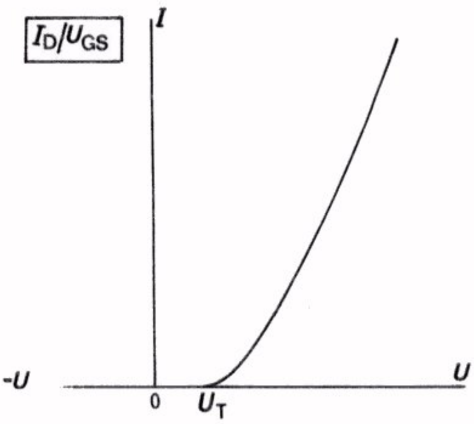
Het symbool voor de n-kanaal MOS transistor van het verarmingstype is:



N-kanaal

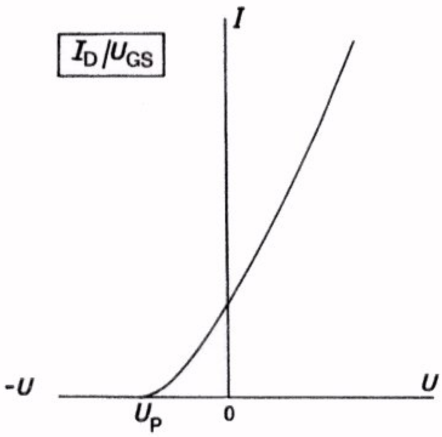
Nog eens samengevat:

verrijkingstype



Bij stuurspanning 0 is er geen stroom I_D. Om *wel* stroom te doen lopen moet men op de gate een positieve spanning aansluiten.
Men moet de MOST verrijken met bewegelijke ladinkjes.

verarmingstype



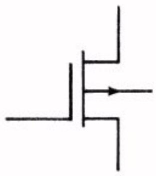
Bij stuurspanning 0 is er wel stroom I_D. Om *geen* stroom te doen lopen moet men op de gate een negatieve spanning aansluiten.
Men moet de MOST verarmen aan bewegelijke ladinkjes.

NOG MEER TYPEN

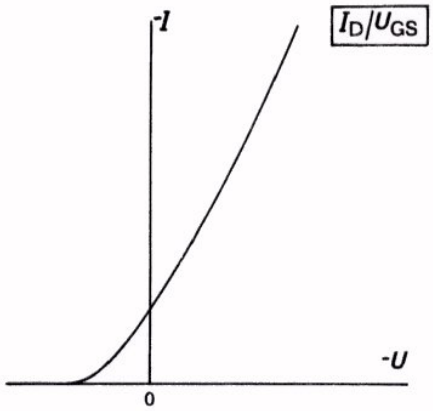
In het voorafgaande behandelden we een MOST waarbij het substraat of de bulk bestond uit *P*-materiaal. In deze MOST ontstond onder invloed van een gatespanning een smaller of breder *N*-kanaal. Nu maakt men ook MOST's met als bulk *N*-materiaal. Onder invloed van een gatespanning ontstaat daarin een *P*-kanaal. We kunnen MOST's dus ook nog onderscheiden in *N*-kanaal-, en *P*-kanaal MOST's.

We zullen niet precies op de werking van deze *P*-kanaal MOST ingaan, maar volstaan met het geven van de overdrachtskarakteristiek en het symbool.

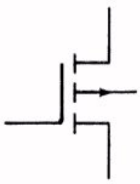
P-kanaal
verarmings-
MOST



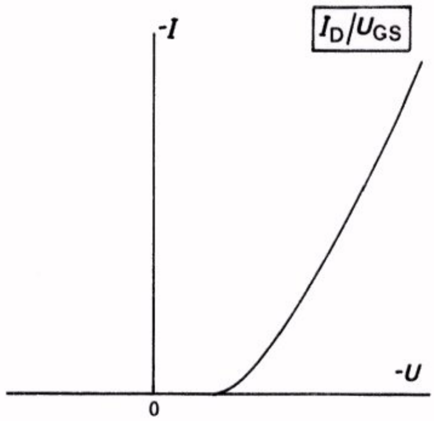
Symbool



P-kanaal
verrijkings-
MOST



Symbool

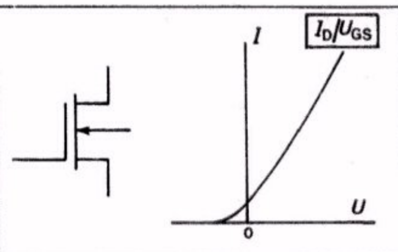
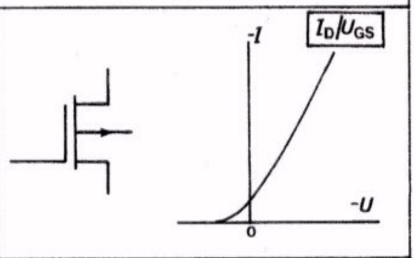
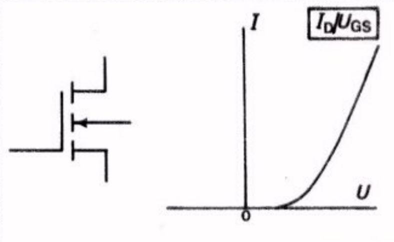
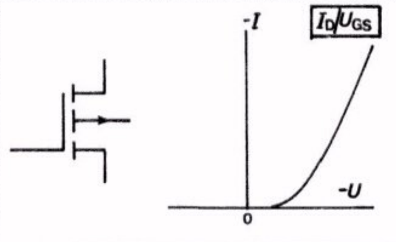


Let er bij bovenstaande karakteristieken op dat de negatieve drainstroom naar boven is uitgezet en de negatieve gatespanning naar rechts.

Het zal u zo zoetjes aan wel duizelen van de typen MOST en de bijbehorende I_D - U_{GS} - karakteristieken.

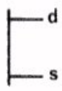
We geven daarom op het volgend blad nog eens een schematisch overzicht.

OVERZICHT VAN DE VIER TYPEN MOST's

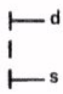
	N-kanaal	*P*-kanaal
verarmings-type		
verrijkings-type		

SCHEMASYMBOLEN

In bovenstaand schema komen 4 symbolen voor die de 4 verschillende typen aanduiden. Deze symbolen zijn logisch opgebouwd. Let op de volgende punten:



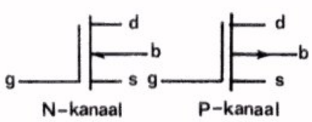
Dit deel van het symbool geeft juist als bij de FET het kanaal aan. Is de MOST bij stuurspanning nul stroomvoerend, dan is de verticale lijn getrokken. Dit is dus het geval bij het verarmingstype.



Bij het verrijkingstype is het kanaal bij stuurspanning nul niet stroomvoerend. Men tekent het kanaal daarom gestreept, d.w.z. onderbroken.



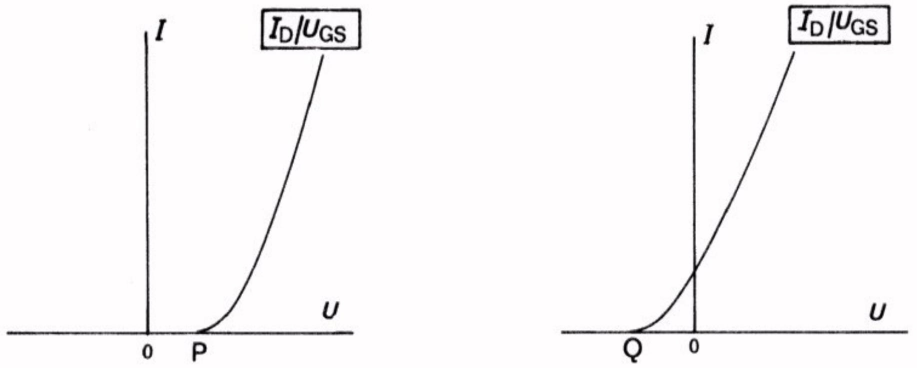
De gate is geïsoleerd van het kanaal. Men tekent deze in het symbool dan ook geïsoleerd. Verder tekent men de gate-aansluiting aan de zijde van de source.



Bij MOST's is er een *PN*-overgang tussen bulk en kanaal aanwezig. Dit geeft men in het symbool aan met een pijlpunt in de bulkleiding. Evenals bij een halfgeleiderdiode wijst de pijl van *P* naar *N*. Is dus de bulk van *P*-materiaal en het kanaal van *N*-materiaal, dan wijst de pijl naar het kanaal toe. Controleer dit laatste in nevenstaande symbolen.

OEFENINGEN

1.



Hoe noemt men de punten P en Q in bovenstaande overdrachtskarakteristieken?

2. Teken hieronder bij elk van de genoemde MOST's het schemasymbool en de bijbehorende overdrachtskarakteristiek.

- *N*-kanaal, verrijkingstype

- *P*-kanaal, verarmingstype

- *N*-kanaal, verarmingstype

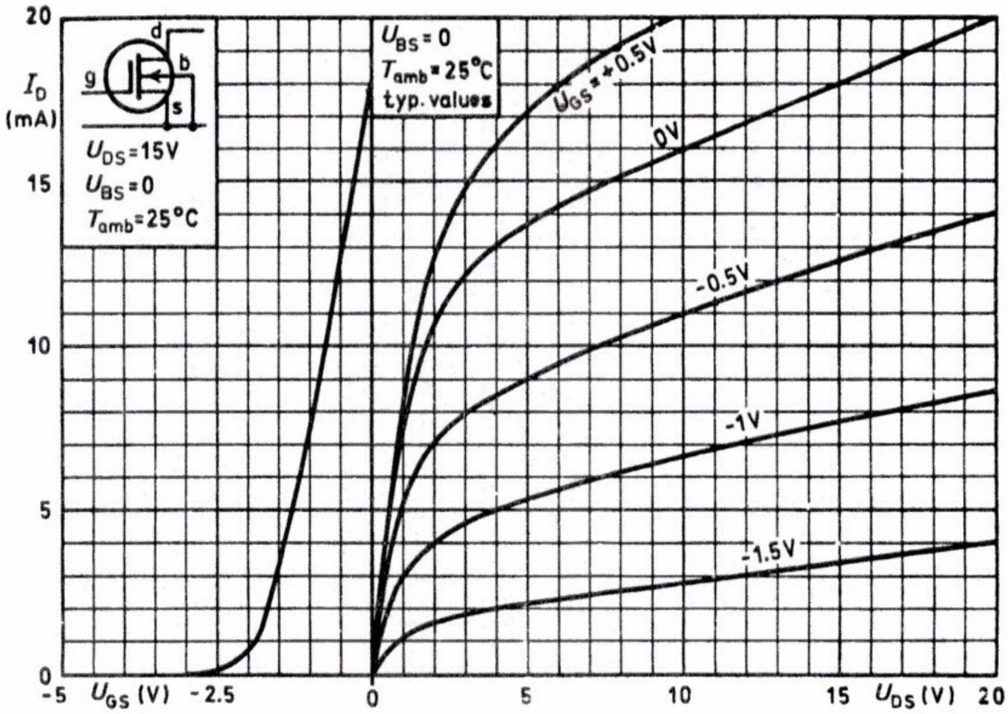
- *P*-kanaal, verrijkingstype

DE OVERDRACHTS- EN DE UITGANGSKARAKTERISTIEKEN

Evenals bij de FET kan men het gedrag van een MOS-transistor inzien aan de hand van de overdrachts- en de uitgangskarakteristieken.

Bij de FET hebt u zelf deze karakteristieken gemeten. Omdat bij de MOS-transistor het meten van de karakteristieken op de zelfde wijze verloopt als bij de FET, voeren we deze metingen niet opnieuw uit.

Hieronder ziet u in één grafiek zowel de overdrachts- als de uitgangskarakteristieken weergegeven zoals die door een fabrikant zijn gepubliceerd in een handboek. Deze grafieken horen bij de MOS-transistor BFR 29.

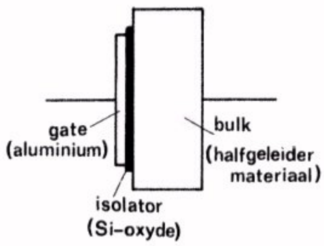


De overdrachtskarakteristiek is geldig voor U_{DS} = 15 V. Verder is de bulk steeds doorverbonden met de source (U_{BS} = 0 V).

U ziet dat deze karakteristieken veel lijken op de overeenkomstige FET-karakteristieken.

BEVEILIGING VAN DE MOST

Bij montage van een MOST moet men er erg voor oppassen dat deze niet kapot gaat. Dat dit kan gebeuren kunnen we het eenvoudigst inzien door de MOST op te vatten als een condensator.



De gate en de bulk vormen dan de twee condensatorplaten, die gescheiden zijn door een oxydeisolator.

Stel nu het geval, dat de aansluitdraden van de MOST moeten worden vastgesoldeerd. Een soldeerbout bevat altijd een zekere elektrische lading. Aanraking van de soldeerbout met bijvoorbeeld de gate-aansluiting heeft tot gevolg dat een hoeveelheid lading van de soldeerbout naar de condensator vloeit. De gate verkrijgt hierdoor een zekere lading en de bulk een even grote tegengestelde lading. Zo ontstaat er een spanningsverschil tussen de gate en de bulk. Deze spanning is gelijk aan:

$$U = \frac{Q}{C}.$$

Bij de MOST heeft de capaciteit C een zeer kleine waarde. Een kleine lading Q veroorzaakt daarom al gauw een grote spanning U. Deze spanning kan een waarde bereiken van wel 100 V. Bij zo'n grote spanning ontstaat er een doorslag tussen de gate en de bulk. Het isolerende laagje is dan onherstelbaar vernietigd.

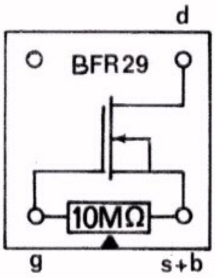
Zo'n doorslag kan ook reeds optreden als wij de MOST met onze hand beetpakken. Een MOST is dus erg kwetsbaar. Om de MOST tegen dit defect raken te beveiligen zijn de aansluitdraden kortgesloten door een ringetje gemaakt van rubber waardoor een goed geleidend poeder is gemengd. Hiermede wordt voorkomen dat er een spanningsverschil tussen de elektroden optreedt. Pas nadat de MOST in de schakeling is gemonteerd, mag men het ringetje verwijderen! Indien dit ringetje om de een of andere reden niet meer aanwezig is mag de MOST alleen gesoldeerd worden met een geaarde soldeerbout.

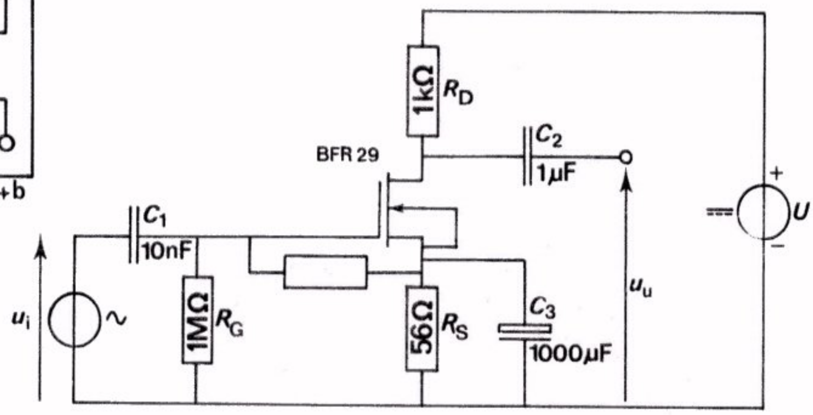
OPMERKING

In deze les gaan we straks aan een MOST een meting verrichten. Deze MOST is reeds gemonteerd op een vierpool. Om te voorkomen dat de gate een te hoge spanning ten opzichte van de bulk krijgt, is tussen de gate en de source een weerstand van 10 MΩ gemonteerd. Bovendien zijn source en bulk met elkaar doorverbonden. Bekijk de gegeven vierpool eens goed.

OPDRACHT: DE MOST ALS VERSTERKEND ELEMENT

Evenals met een FET kan men met een MOST versterken. In deze opdracht gaan we dit ervaren.





- Bouw bovenstaande schakeling. Dit is een GSS (denk aan de overeenkomstige schakeling met een FET).
- Maak de voedingsspanning U = 20 V.
- Meet de spanning U_{GS}. U_{GS} = ☐
- Meet de spanning U_{DS}. U_{DS} = ☐
- Bereken I_D. I_D = ☐
- Voer een wisselspanning met U_{it} = 200 mV toe bij f = 1 kHz.
- Meet met de oscilloscoop de uitgangswisselspanning U_{ut}.

  U_{ut} = ☐
- De wisselspanningsversterking A_u is dus: A_u = ☐
- Bepaal de fasedraaiing tussen uit- en ingangsspanning.

  u_u is in | fase / tegenfase | met u_i.

CONCLUSIE

Met een MOST kan men wisselspanning versterken.

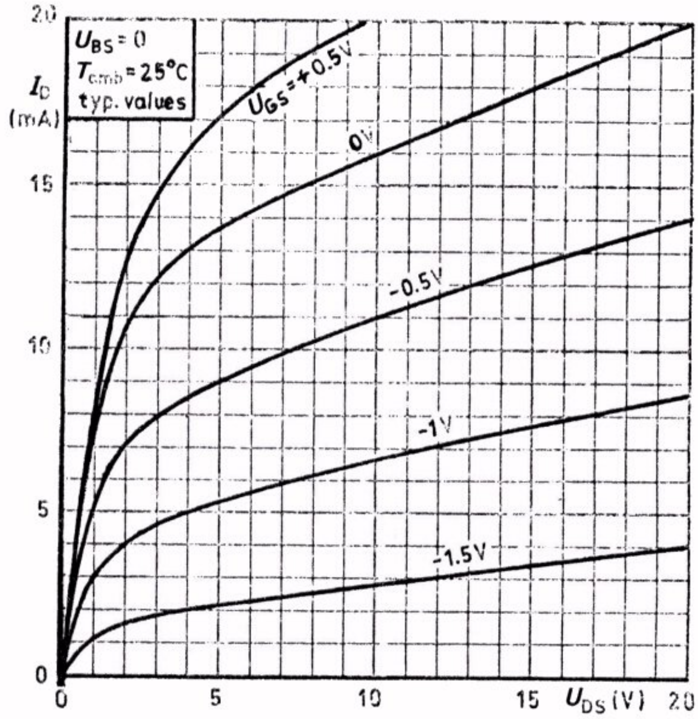
OEFENINGEN

1. Bereken de steilheid van de MOST bij de vorige opdracht.

$S =$ [ ]

Bedenk: Voor de FET in GSS geldt $A_u = S \cdot R_D$. Ook voor een MOST in GSS zal deze formule gelden.

2.



Dit zijn de uitgangskarakteristieken van een MOST.

- Teken de belastinglijn voor $R_D = 1{,}5\ k\Omega$ en een voedingsspanning van 20 V.
- Bepaal het werkpunt voor $U_{GS} = -1$ V.

$I_D =$ [ ]

$U_{DS} =$ [ ]

- Bepaal grafisch de spanningsversterking als $U_{(gs)t} = 0{,}5$ V:

$A_u =$ [ ]

CODERING VAN TRANSISTORS

Voor de *lagen*-transistor, de FET's en de MOST's gebruikt men één coderingssysteem. Dit systeem is als volgt opgebouwd:

De eerste letter duidt het *materiaal* aan.

A germanium

B silicium

Germanium wordt alleen bij de lagentransistors toegepast.

De tweede letter heeft betrekking op de *toepassing*.

C voor lage frequenties.

D voor lage frequenties en grotere vermogens.

F voor hoge frequenties.

L voor hoge frequenties en grotere vermogens.

S voor schakeldoeleinden.

U voor schakeldoeleinden en grotere vermogens.

Daarna volgt nog een aanduiding voor de *serie*.

Deze bestaat uit:

- of drie cijfers.
  Dit zijn transistors in bijvoorbeeld radio- en TV-apparaten.
- of één letter en twee cijfers.
  Deze transistors vinden voornamelijk toepassing in professionele apparatuur. Zij voldoen aan hogere eisen.

VOORBEELDEN

BC 107 → silicium, L.F., b.v. in radio

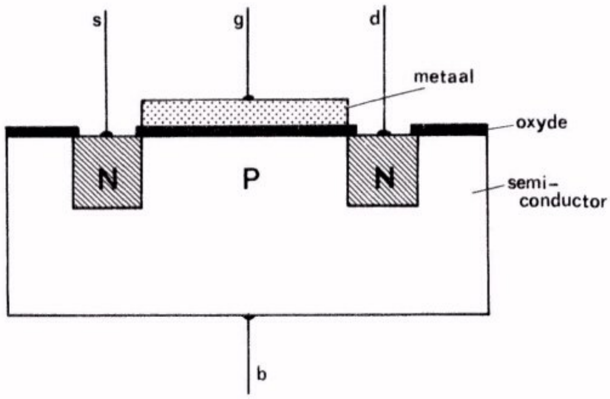
BFW 10 → silicium, HF, professioneel

OPMERKING

Uit het codenummer volgt niet of men nu met een lagentransistor, een FET of een MOST te maken heeft. Dit kan men te weten komen door het raadplegen van de door de fabrikant gepubliceerde gegevens.

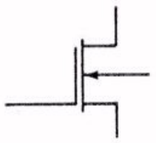
SAMENVATTING

● Hier ziet u de doorsnede van een MOST.

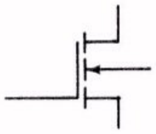


● Een spanning op de gate beïnvloedt de drainstroom door het kanaal.

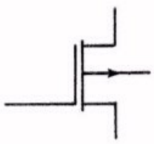
● Men kan MOST's in vier typen onderscheiden, die met verschillende schemasymbolen worden aangeduid.



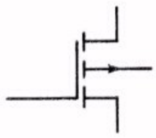
N-kanaal, verarmingstype



N-kanaal, verrijkingstype



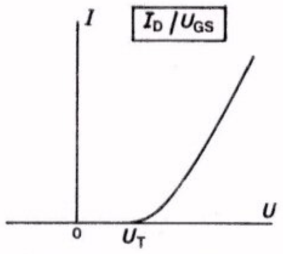
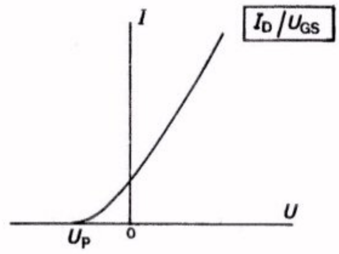
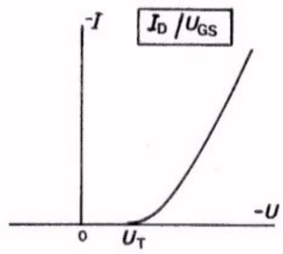
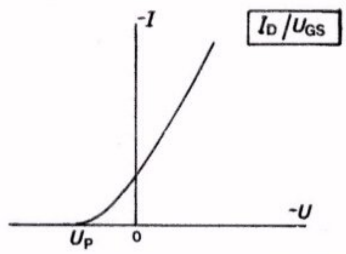
P-kanaal, verarmingstype



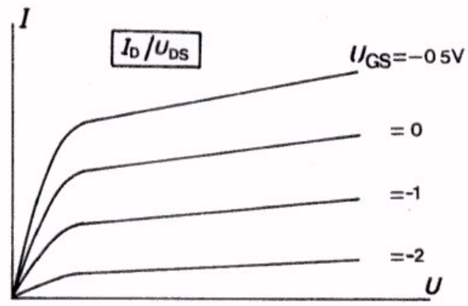
P-kanaal, verrijkingstype

Ezelsbruggetje: In de *n*-kanaal MOST wijst de pijl in het symbool *n*aar het symbool toe.

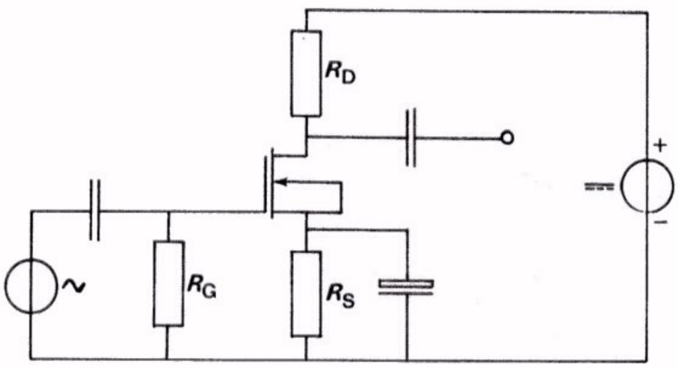
● De overdrachtskarakteristiek geeft het verband tussen ingangsspanning U_{GS} en uitgangsstroom I_D. Elk type MOST heeft een andere U_{GS} - I_D - karakteristiek.

	Verrijkingstype	Verarmingstype
N- kanaal		
P- kanaal		

● Hier ziet u de uitgangskarakteristieken-bundel van een *N*-kanaal verarmingstype.



● Ook de MOST kan als versterkend element dienst doen. Hier ziet u een complete versterkerschakeling met een MOST in GSS.



NAAM: **KLAS:**

OEFENINGEN

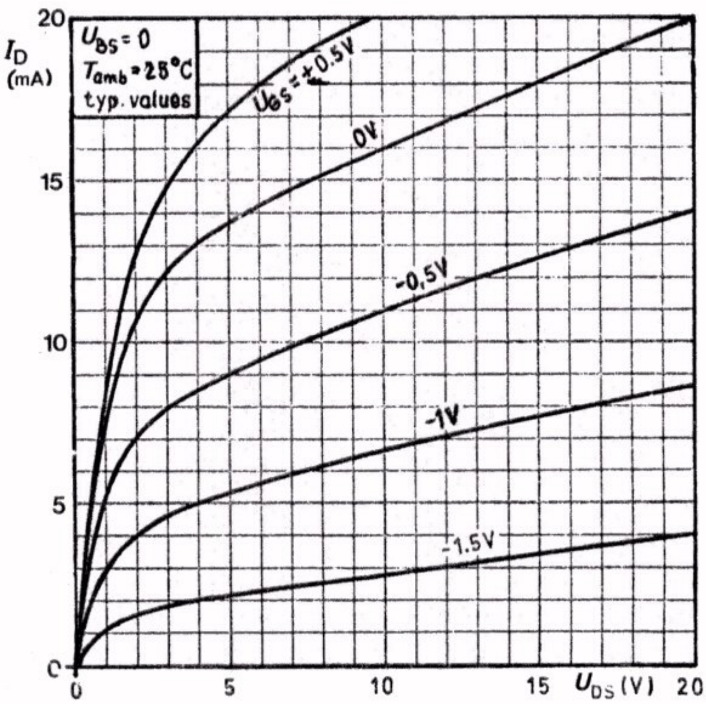
1. Teken de doorsnede van een MOST, waaruit zijn opbouw is te zien.

2. Als men een MOST uit de verpakking haalt, blijkt hij voorzien te zijn van een rubber ring om de aansluitdraden. Waartoe dient deze ring? Wanneer verwijdert u die ring?

3. Bij de MOST bevindt zich tussen de gate en de source een:

laagje halfgeleidermateriaal	O
diode in sperrichting	O
diode in doorlaatrichting	O
een isolerende laag	O

4. Een MOST is opgenomen in een schakeling met een drainweerstand van 1 kΩ. De voedingsspanning is 20 V. De MOST heeft volgende uitgangskarakteristieken.



De gate-instelspanning U_{GS} = −0,5 V.

De ingangswisselspanning $U_{(gs)t}$ = 0,5 V.

Bepaal de spanningsversterking:

A_u =

B 226

HERHALING FET EN MOST

In de voorafgaande lessen hebben we twee typen transistors behandeld: de FET en de MOST. Deze hebben we herhaaldelijk vergeleken met de reeds eerder behandelde *lagentransistor*. In deze herhalingsles zetten we de eigenschappen van genoemde drie componenten nog eens overzichtelijk naast elkaar. Hun overeenkomsten en verschillen komen daarbij duidelijk aan het licht.

- Werk deze les met grote aandacht door.
- Zijn er nog onduidelijkheden, vraag dan uw leraar om nadere uitleg.
- Maak gebruik van de *geheugensteun*.

In de volgende les volgt een test over de FET en de MOST. Op deze test kunt u zich het best voorbereiden door de samenvattingen van de voorafgaande lessen nog eens door te nemen. Komt u daarin onbegrijpelijke dingen tegen, dan moet u de betreffende les er nog eens op nalezen. Kijk ook nog eens naar oefeningen, vooral die waar u fouten in maakte.

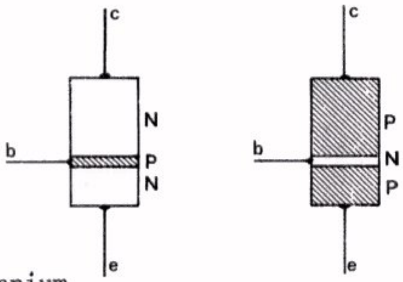
DE OPBOUW VAN LAGENTRANSISTOR, FET EN MOST

We beginnen met erop te wijzen dat het voor de toepassingen in de praktijk van de elektronica helemaal niet zo belangrijk is om te weten hoe componenten nu precies zijn opgebouwd. Dat wij aan de opbouw van lagentransistor, FET en MOST toch enige aandacht geschonken hebben, heeft twee redenen:

De eerste is om begrip te krijgen voor de benaming van de aansluitingen. De tweede om enig idee te verkrijgen van de werking van de component en om het symbool te begrijpen dat in schema's wordt gebruikt.

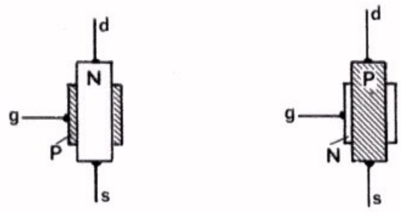
Hieronder volgt de schematische opbouw:

- LAGENTRANSISTOR



Soms vervaardigd uit germanium, meestal uit silicium.

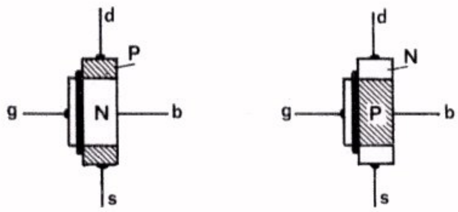
- FET



Vervaardigd uit silicium.

N-kanaal *P*-kanaal

- MOST

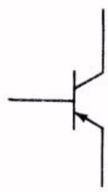


P-kanaal *N*-kanaal

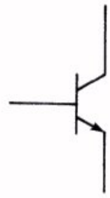
Vervaardigd uit silicium. De gate is echter van metaal, meestal aluminium.

SCHEMASYMBOLEN

- LAGENTRANSISTOR

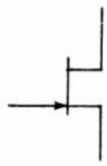


PNP

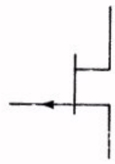


NPN

- FET

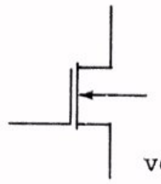


N-kanaal

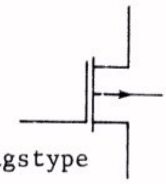


P-kanaal

- MOST

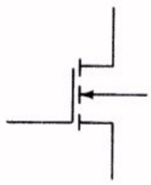


N-kanaal

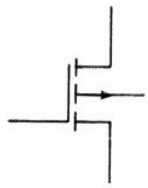


P-kanaal

verarmingstype



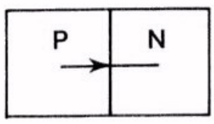
N-kanaal



P-kanaal

verrijkingstype

Ga na dat in al deze symbolen het pijltje → een overgang van *P*- naar *N*-materiaal aanduidt, dus:

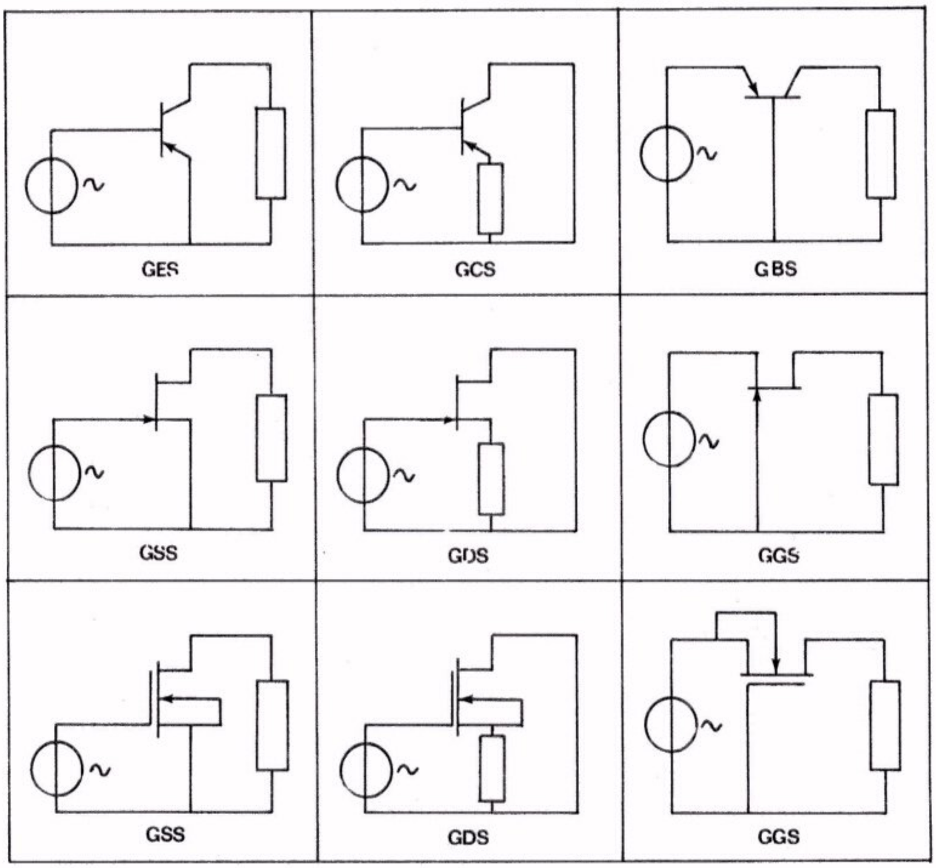


DE DRIE GRONDSCHAKELINGEN

Bij de lagentransistor maakten we voor het eerst kennis met de drie grondschakelingen: de gemeenschappelijke emitterschakeling, de gemeenschappelijke collectorschakeling en de gemeenschappelijke basisschakeling. afgekort: GES, GCS en GBS.

Welke heet *emittervolger*?

In principe zijn met de FET en de MOST soortgelijke schakelingen mogelijk. Hieronder volgt een overzicht van de eenvoudigste wisselstroomschema's van deze schakelingen.



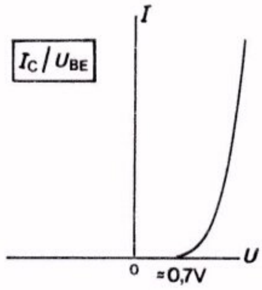
De GGS met FET of MOST wordt nagenoeg nooit toegepast.

DE OVERDRACHTSKARAKTERISTIEK

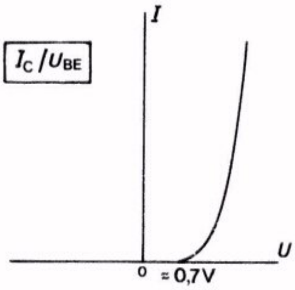
Bij de lagentransistor, de FET en ook bij de MOST kregen we te maken met de overdrachtskarakteristiek. Voor al deze componenten geldt, dat dit de karakteristiek is die een verband legt tussen de *uitgangsstroom* en de *ingangsspanning* van de component. Hieronder volgt een complete opsomming van mogelijke overdrachtskarakteristieken.

Bestudeer deze karakteristieken goed en maak oefening 1 op het volgend blad.

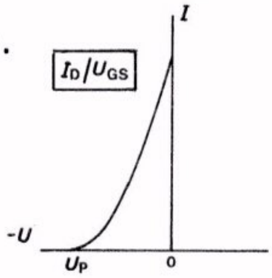
1.



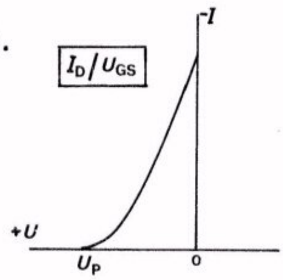
2.



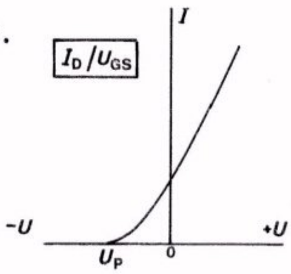
3.



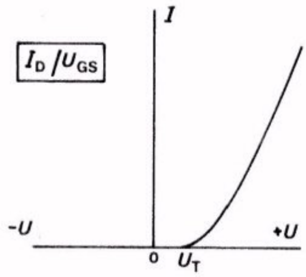
4.



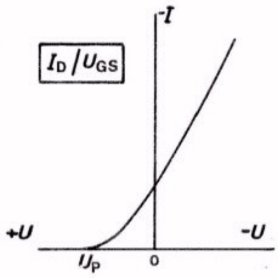
5.



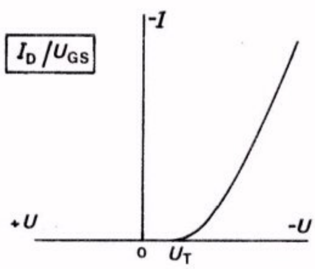
6.



7.



8.



OEFENINGEN

1. De overdrachtskarakteristieken op het vorig blad zijn genummerd van 1 t/m 8. Hieronder zijn deze nummers herhaald. Zet in de vakjes er achter bij welke component de karakteristiek hoort. Geef tevens aan van welk type de component is, door te vermelden: *PNP*, *NPN*, *N*-kanaal, *P*-kanaal, verarming of verrijking.

1.		2.	
3.		4.	
5.		6.	
7.		8.	

2. De overdrachtskarakteristiek van een lagentransistor geeft het verband tussen:

I_C en U_{CE} O
I_D en U_{GS} O
I_D en U_{DS} O
I_C en U_{BE} O

3. Bij de lagentransistor hebben we ook gesproken over de ingangskarakteristiek. Deze legt een verband tussen:

en

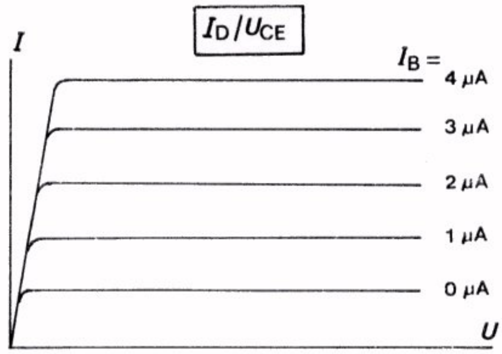
4. De uitgangskarakteristiek van een FET legt verband tussen:

en

DE UITGANGSKARAKTERISTIEKEN

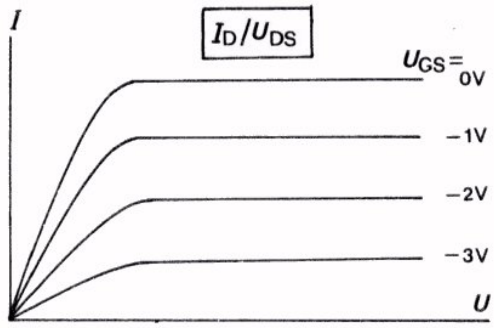
Zowel voor de lagentransistor, de FET, als de MOST publiceert de fabrikant uitgangskarakteristieken. Deze leggen een verband tussen *uitgangsstroom* en *uitgangsspanning*.

- LAGENTRANSISTOR



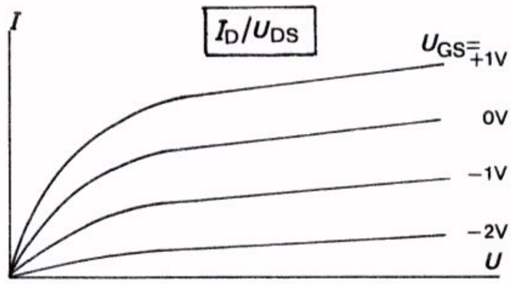
Hier geeft de uitgangskarakteristiek het verband tussen I_C en U_{CE} voor verschillende waarden van de ingangs*stroom* I_B. Op deze wijze ontstaat een *bundel* uitgangskarakteristieken. Soms geeft men zo'n bundel bij verschillende ingangsspanningen U_{BE}.

- FET



Hier geeft de uitgangskarakteristiek het verband tussen I_D en U_{DS}. Voor een aantal waarden van de ingangs*spanning* U_{GS} is een uitgangskarakteristiek getekend.

- MOST

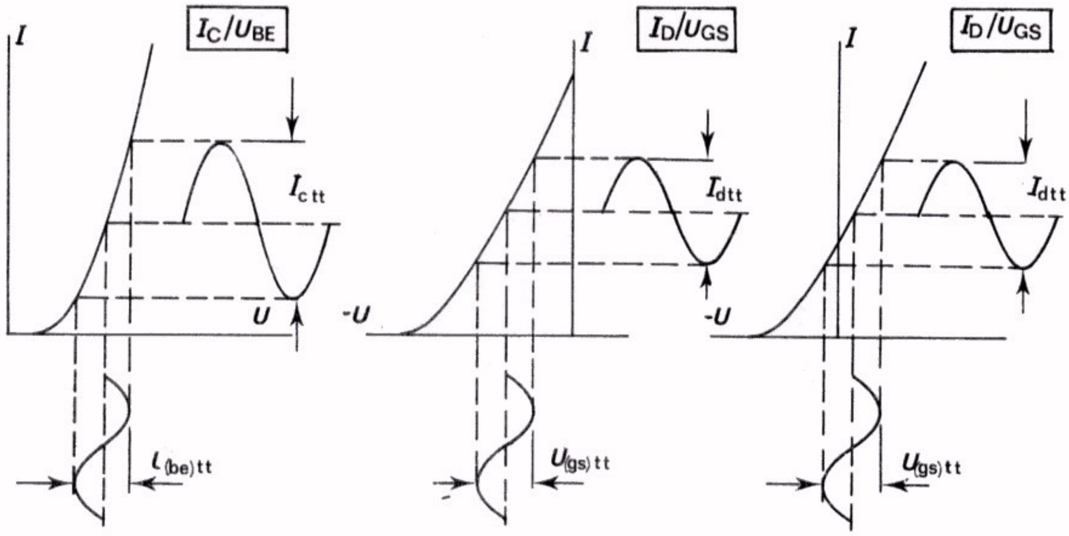


Hier ziet u een bundel uitgangskarakteristieken van een MOST. Wat voor type MOST zou dit zijn?

HET BEGRIP STEILHEID

Bij de lagentransistor, de FET en de MOST zijn we het begrip steilheid S tegengekomen. In al deze gevallen heeft de steilheid iets te maken met de helling van de overdrachtskarakteristiek. In volgende grafieken wordt dit duidelijk.

LAGENTRANSISTOR FET MOST



$$S = \frac{i_c}{u_{be}}$$ $$S = \frac{i_d}{u_{gs}}$$ $$S = \frac{i_d}{u_{gs}}$$

We hebben gezien dat S een belangrijke grootheid is, omdat men daarmee de spanningsversterking kan berekenen:

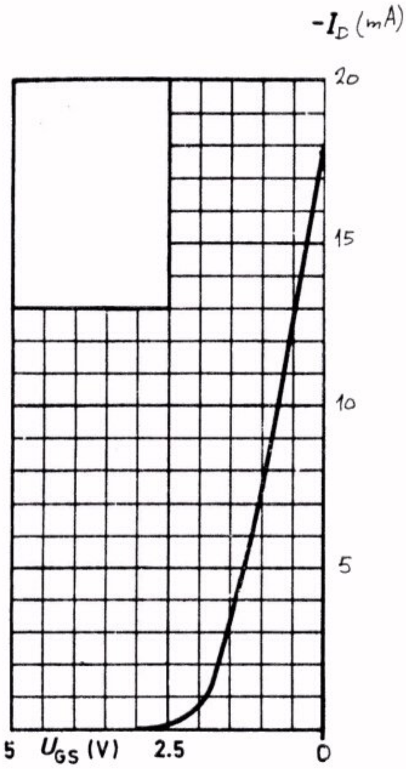
$$A_u = S \cdot R_C$$ $$A_u = S \cdot R_D$$ $$A_u = S \cdot R_D$$

We hebben gezien dat de steilheid bij de lagentransistor zeer groot kan zijn, b.v. S = 500 mA/V. Bij de FET en de MOST is hij veel lager, b.v. S = 5 mA/V.

OEFENINGEN

1. Bij welk type transistor behoort deze overdrachtskarakteristiek?

[ ]

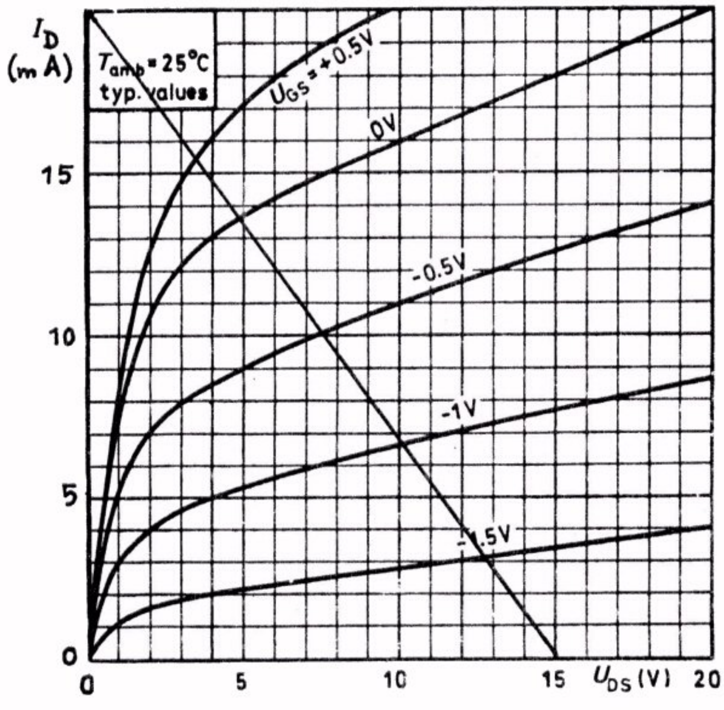


Teken het symbool voor dit type in het hokje links boven de karakteristiek.

Bepaal de steilheid tussen de punten U_{GS} = 0,5 Ven 1,5 V.

S = [ ]

2.



Hoe groot is in dit geval de drainweerstand?

R_D = [ ]

Bepaal de spanningsversterking A_u als

$-U_{GS}$ = 0,5 V en $U_{(gs)t}$ = 0,5 V.

A_u = [ ]

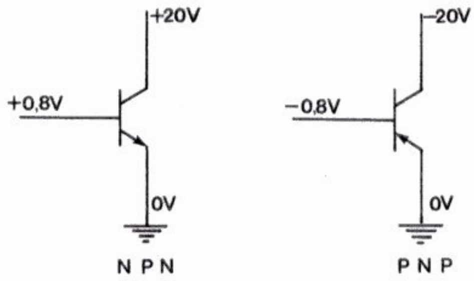
Wat voor type transistor is dit?

[ ]

DE INSTELLING VAN DE VERSCHILLENDE TRANSISTORS

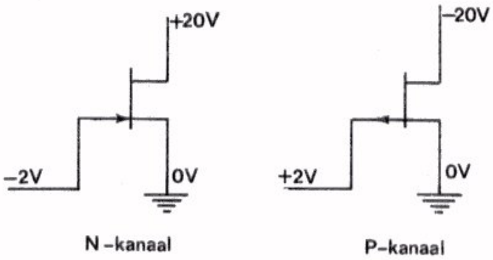
De lagentransistor, de FET en de MOST kunnen worden gebruikt voor het versterken van wisselspanningen. Daartoe moet men deze componenten een gelijkstroominstelling geven. Deze verwezenlijkt men bij de verschillende transistors op verschillende wijzen. We laten ze nog eens de revue passeren.

● LAGENTRANSISTOR



De spanning op de basis ligt tussen die op de collector en die op de emitter in. Zie voorbeeld.

● FET



De spanning op de gate ligt *niet* tussen die op de drain en de source in. Zie voorbeeld.

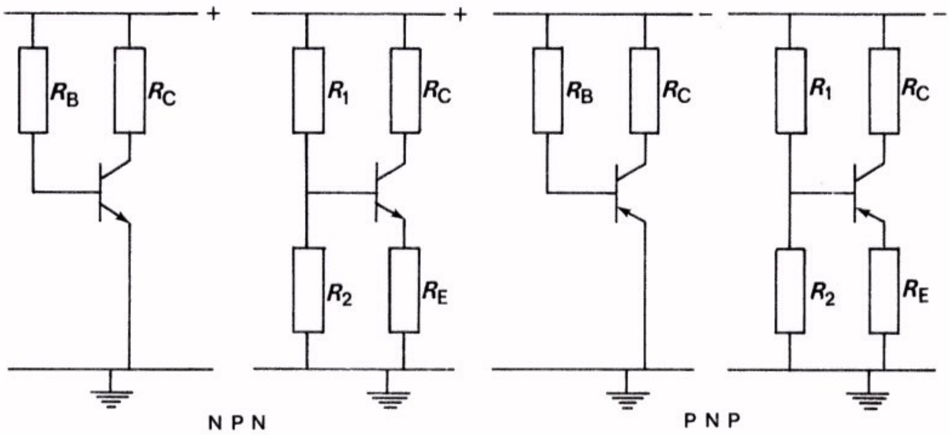
● MOST

Bij de instelling van de MOST moeten we onderscheid maken tussen de verschillende typen.

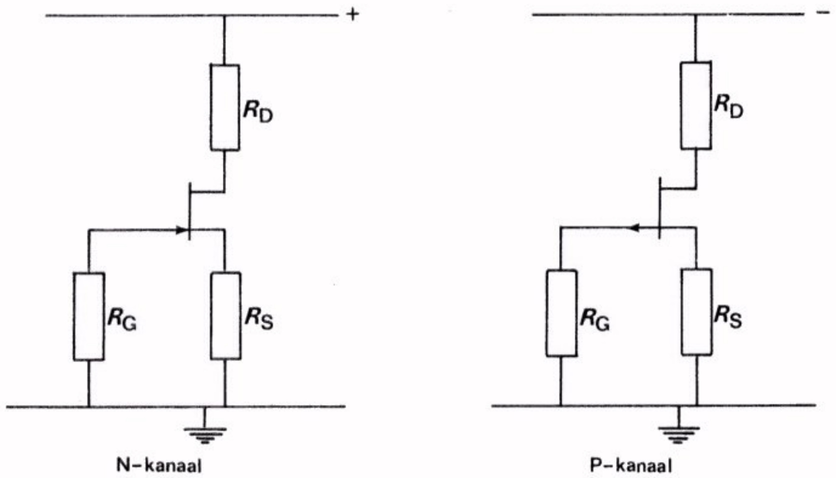
- Het verrijkingstype heeft een overdrachtskarakteristiek die lijkt op die van de lagentransistor. De gate-spanning ligt dan tussen die op de drain en die op de source in.
- Het verarmingstype heeft een overdrachtskarakteristiek zoals die van de FET. De gatespanning ligt *niet* tussen die op de drain en die op de source in.

Praktisch zorgt men als volgt voor de genoemde instellingen:

● LAGENTRANSISTOR



● FET



De gatespanning wordt automatisch verkregen door middel van een source-weerstand.

● MOST

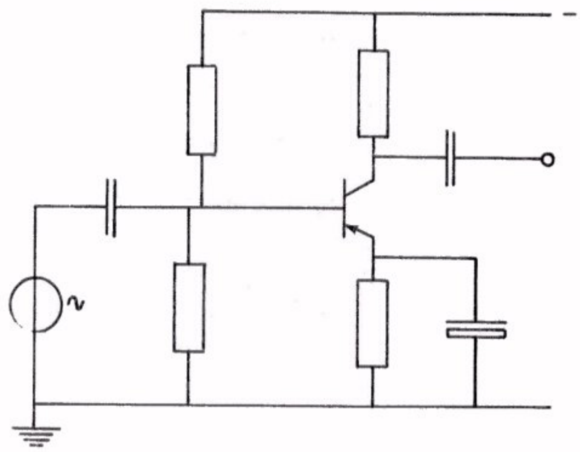
De praktische verwezenlijking van de instelling hangt hier uiteraard weer van het type af. Voor welk type gebruikt men b.v. een spanningsdeler?

Opmerking: Een punt van belang in de praktische schakelingen is dat R_E bij de lagentransistors en R_S bij de FET's en MOST's zorgt voor stabilisatie van de hoofdstroom (I_C of I_D).

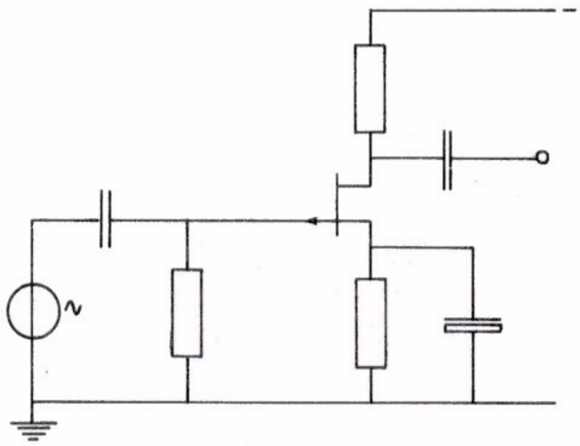
COMPLETE VERSTERKSCHAKELINGEN

Als voorbeeld geven we hier nog eens een compleet schema van een verstertrap met een lagentransistor, een FET en een MOST.

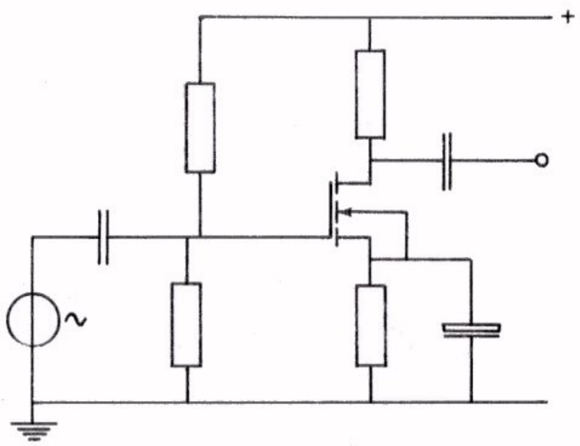
- *PNP*-TRANSISTOR IN GES.



- FET, *P*-KANAAL TYPE IN GSS.

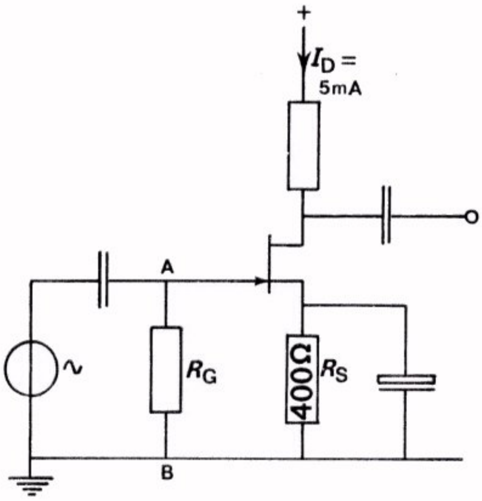


- MOST, *N*-KANAAL VERRIJKINGSTYPE IN GSS.



OEFENINGEN

1.



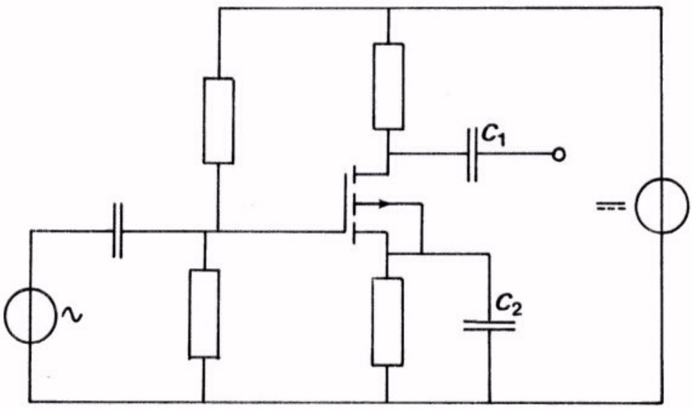
Hoe groot is de spanning op de gate?

U_{GS} =

Welke spanning staat er tussen de punten A en B?

U_{AB} =

2. Geef in volgend schema de polariteit aan van de voedingsbron en de condensators, voor het geval dat hiervoor elco's moeten worden gebruikt.



3. Waarom wordt bij een *lagentransistor* in GES in de emitterleiding vaak een emitterweerstand opgenomen?

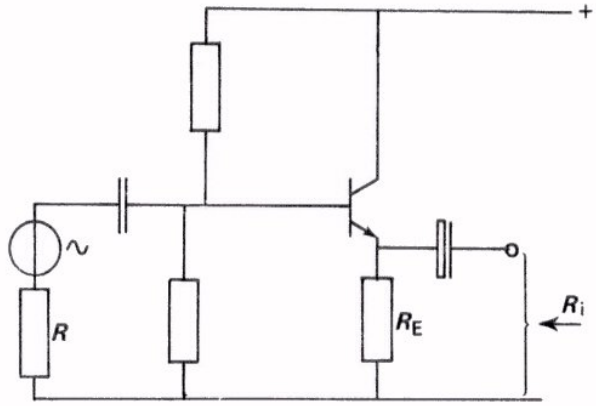
1.

2.

De sourceweerstand is bij een FET in GSS om dezelfde redenen opgenomen, maar bovendien om:

DE EMITTER- EN DE SOURCEVOLGER

Bij de lagentransistor maakten we kennis met de emittervolger. Deze schakeling wordt gebruikt als een soort "weerstandstransformator". De uitgangsweerstand R van de voorafgaande schakeling is namelijk hoog en die van de emittervolger laag. Hier volgt de emittervolger nog eens met de daarbij gebruikte formules.

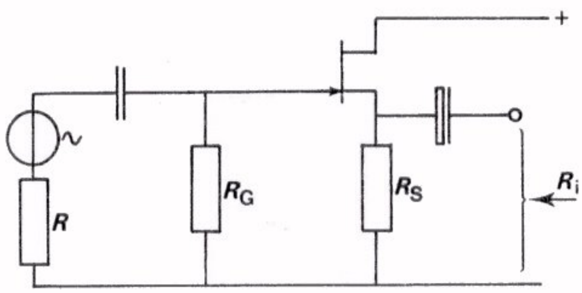


$$R_{ing} = h_{ie} + h_{fe} \cdot R_E$$

$$R_i = \frac{\frac{1}{S} \cdot R_E}{\frac{1}{S} + R_E} \approx \frac{1}{S}$$

$$A_u = \frac{S \cdot R_E}{1 + S.R_E} < 1.$$

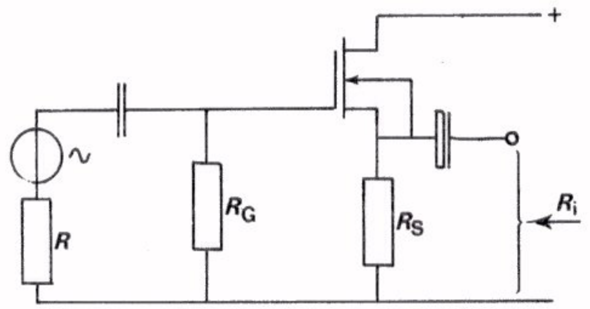
De sourcevolger bij de FET en bij de MOST is daarmee vergelijkbaar.



$$R_{ing} \approx R_G$$

$$R_i = \frac{\frac{1}{S} \cdot R_S}{\frac{1}{S} + R_S}$$

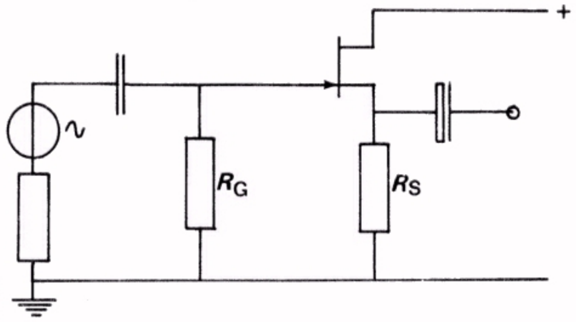
$$A_u = \frac{S \cdot R_S}{1 + S.R_S} < 1.$$



OEFENINGEN

1. In deze schakeling is:

R_G = 1 MΩ
R_S = 1200 Ω
S = 2,5 mA/V.



Bereken de uitgangsweerstand:

R_i =

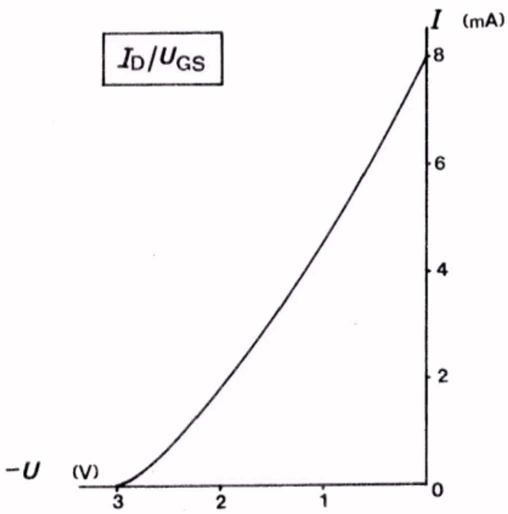
Bereken ook A_u.

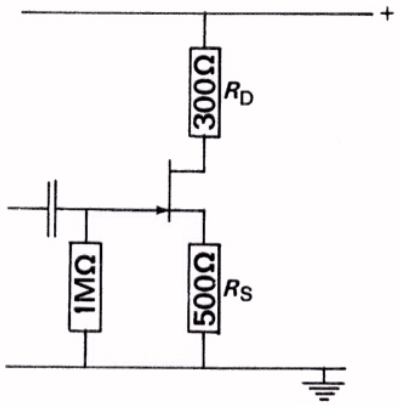
A_u =

Men belast nu de schakeling met R = 300 Ω. Hoe groot is dan de versterking?

A_u =

2. De overdrachtskarakteristiek van de FET in deze schakeling is hieronder gegeven.





Bepaal de instelspanning op de gate.

U_{GS} =

VERGELIJKING VAN DE VERSCHILLENDE TRANSISTORS

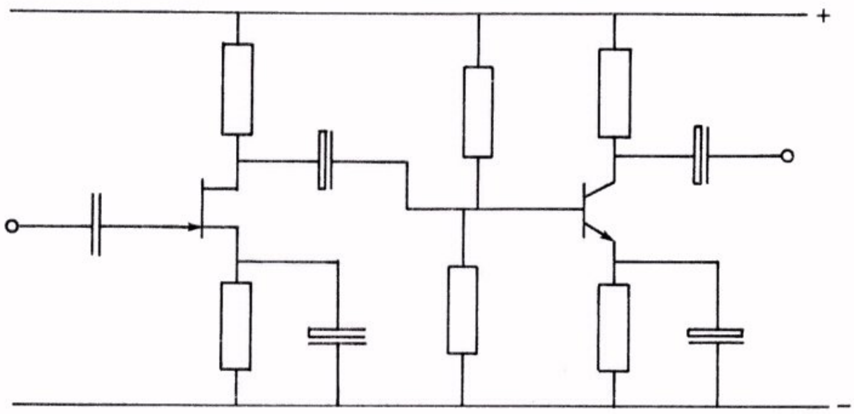
- Een belangrijk voordeel van de lagentransistor is dat zijn steilheid zeer groot kan zijn. Met zo'n transistor kan men dus veel versterken.
- De uitgangskarakteristieken van de lagentransistor lopen over een groter gedeelte dan bij FET en MOST vlak. Men kan een lagentransistor dus verder uitsturen.
- Een voordeel van de FET en de MOST is de hoge ingangsweerstand.
- FET en MOST veroorzaken weinig ruis. Dit hangt samen met het feit, dat de hoofdstroom (I_D) bij deze componenten geen *PN*-overgang passeert.

  Dit is een van de redenen dat men een FET of en MOST vaak aan de ingang van een versterker toegepast ziet. Zie volgend blad.
- Een voordeel van de MOST is verder nog dat de gate volkomen geïsoleerd is van de bulk.

Overigens is de ontwikkeling van de FET en de MOST nog in volle gang. Het is nu nog te vroeg om precies te zeggen waar de FET's en waar de MOST's hun toepassingen vooral zullen gaan vinden.

OEFENING

Hieronder ziet u een compleet schema van een tweetrapsversterker. In de eerste trap is een FET in de tweede een lagentransistor opgenomen.



Welke van de telkens gegeven 3 antwoorden op een vraag is *niet* juist?

De schakeling begint met een FET, en niet met een lagentransistor, omdat:

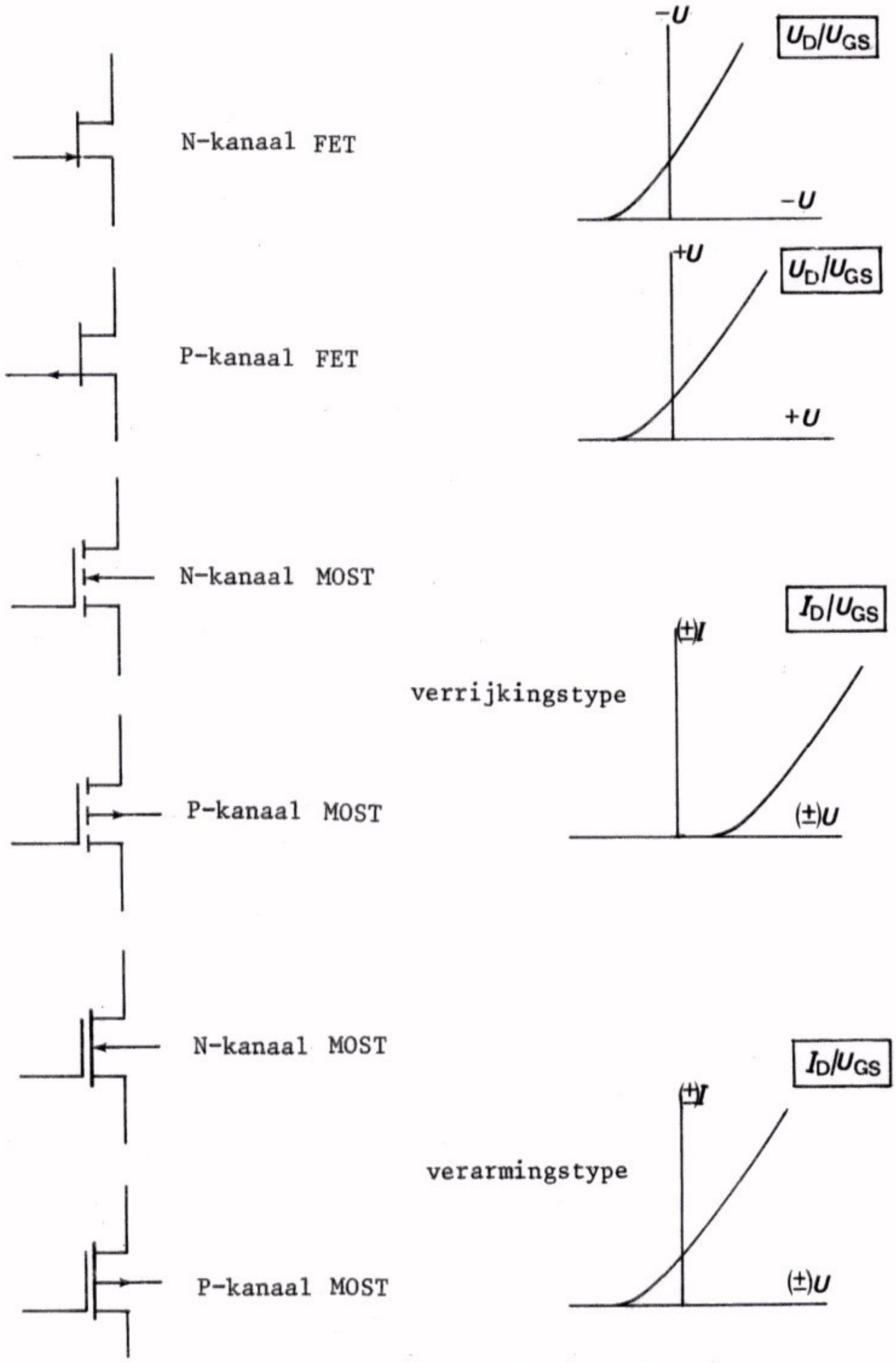
- de ingangsweerstand van de FET veel groter is. O
- bij versterking van zeer kleine spanningen de FET minder ruisstoring geeft. O
- men een kleine ingangsspanning met een FET meer kan versterken. O

De schakeling eindigt met een lagentransistor, en niet met een FET, omdat:

- een lagentransistor minder gevoelig is voor temperatuurvariaties. O
- het reeds versterkte signaal door een lagentransistor meer versterkt kan worden. O
- een lagentransistor een grotere uitgangswisselspanning kan leveren. O

G E H E U G E N S T E U N

FET en MOST



De N-kanaal transistors hebben symbolen waarin de pijl naar het symbool toe wijst, de pijlen in de symbolen van de P-kanaal transistors wijzen naar buiten.

Voor alle in dit traject besproken transistors geldt:

gss	hoge ingangsweerstand
gds	lage uitgangsweerstand